

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОУ ВПО «СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»

ГЕО-СИБИРЬ-2005

Т. 6

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ

Сборник материалов
научного конгресса

Новосибирск
СГГА
2005

УДК 681.2:006.91
С 26

Ответственный за выпуск:
координатор направления «Специализированное приборостроение, метрология»,
кандидат технических наук, профессор Сибирской государственной
геодезической академии
О.К. Ушаков

С 26 ГЕО-Сибирь-2005. Т. 6. Специализированное приборостроение,
метрология: Сб. материалов научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2005», 25 – 29
апреля 2005 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2005. – 240 с.

ISBN 5-87693-171-3

В сборнике опубликованы материалы научного конгресса «ГЕО-Сибирь-
2005» направления «Специализированное приборостроение, метрология».

Печатается по решению Редакционно-издательского совета СГГА

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 681.2:006.91

ISBN 5-87693-171-3

© ГОУ ВПО «Сибирская государственная
геодезическая академия», 2005

УДК 681.7

E. Anurjew¹, J.J. Brandner, E. Hansjosten, U. Schygulla, K. Schubert

Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Mikroverfahrenstechnik

Postfach 3640, D-76021 Karlsruhe, Deutschland

MIKROVERFAHRENSTECHNIK UND RAPID PROTOTYPING IM FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

МИКРОСТРУКТУРТЕХНИКА И РАПИД ПРОТОТУПИНГ В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ЦЕНТРЕ КАРЛСРУЭ

Аннотация

Применение микротехники за прошедшие годы во многих областях науки и техники сделало возможным получить новые знания и разработать технологии, недостижимые никаким другим образом. Это относится в полной мере и к области микроструктурной техники. Передатчики тепла величиной со спичечный коробок из стали, с тысячами каналов соизмеримых с человеческим волосом, достигают специфической поверхности до 20000 м²/м³. При потерях давления до 1 Бар может быть передано количество тепла более 10 Квт. Использование материалов с понижающим действием на огневой пробой и высокой стабильностью по давлению (до многих сотен Бар) делает даже возможным использование аппаратов в технологиях с взрывоопасными смесями. Для производства микроаппаратов наряду с классическими методами обработки используются также различные методы Рапид Прототупинг технологии.

Этот методы позволяют с минимальными затратами послойное производство микрокомпонентов из полимеров и металлов на основе электронных данных трехмерных САД-Моделлей, с последующим использованием их в реальных экспериментах. Предлагаемый доклад дает представление о работе института микроструктуртехники и углубленный взгляд на производство микроструктур с помощью метода стереолитографии для полимеров и метода селективной лазерной обработки для металлов.

Mikrotechnische Komponenten haben in den letzten Jahren in vielen Bereichen aus Naturwissenschaft und Technik den Gewinn neuer Erkenntnisse sowie Arbeits- und Untersuchungsmethoden ermöglicht, die auf andere Art und Weise nicht oder nur schwer erzielbar gewesen wären. Mikrooptische Apparaturen haben die Kommunikationstechnik revolutioniert, ganz zu schweigen von der Mikroelektronik.

Auch für die thermische und chemische Verfahrenstechnik wurden Mikrostrukturapparate entwickelt, die für spezifische Aufgaben gewinnbringend eingesetzt werden können. Metallische Mikrostrukturwärmeübertrager, Mikromischer und Mikroreaktoren für chemische Reaktionen weisen spezifische Eigenschaften auf, die diese Apparate in vielerlei Hinsicht der konventionellen Technik überlegen machen.

Das Institut für Mikroverfahrenstechnik (IMVT) des Forschungszentrum Karlsruhe beschäftigt sich seit etwa zehn Jahren mit der Auslegung, Simulation, Herstellung und experimentellen Erprobung von Mikrostrukturapparaten. Der vorliegende Beitrag soll einen Überblick über die Möglichkeiten des Instituts liefern. Etwas genauer wird anhand von wenigen Beispielen auf die Technik der Stereolithographie sowie damit realisierbare Mikrostrukturapparate und deren Anwendungen eingegangen.

Das IMVT nimmt im Bereich der Mikroverfahrenstechnik weltweit eine Sonderstellung ein. Innerhalb eines einzigen Instituts sind alle Prozessschritte zur Entwicklung von verfahrenstechnischen Komponenten im Mikromaßstab vorhanden, von Design über Simulation und Modellierung, Fertigung der einzelnen Teile von Mikrostrukturapparaten, Aufbau- und Verbindungstechnik, Beschichtung und Einbringen von Katalysatoren bis hin zu experimenteller Charakterisierung der fertigen Apparate. Neben metallischen Mikrowärmeübertragern (vgl. Abb. 1)

¹ e-mail: anurjew@imvt.fzk.de

[1, 2] und Mikromischern (vgl. Abb. 2) [3] werden metallische Mikroreaktoren für spezielle chemische Reaktionen entworfen, hergestellt und getestet [4, 5, 6, 7]. Der prinzipielle Aufbau der Apparate ist dabei meist an den Schritten Mikrostrukturierung (mechanisch, geätzt) – Anordnung in der gewünschten Reihenfolge – Diffusionsschweißen – Adaptieren ausgerichtet (vgl. Abb. 3) [8]. Neben dem Diffusionsschweißen können auch andere Verbindungstechniken wie Laser- oder Elektronenstrahlschweißen eingesetzt werden. Für chemische Mikroreaktoren kommt meist noch das Einbringen katalytisch aktiver Substanzen zu den genannten Schritten hinzu [9].

Die auf diese Weise gefertigten Mikrostrukturapparate weisen spezifische Oberflächen von ca. $20.000 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ auf, sind druckfest bis zu mehreren zehn MPa statischem Druck und können thermische Leistungen von mehreren zehn kW übertragen werden – gemessen mit warmem Wasser gegen kaltes Wasser. Mikromischer können verwendet werden, um unterschiedliche Fluide äußerst effizient miteinander zu mischen oder z.B. Emulsionen herzustellen. Die große aktive Oberfläche von metallischen Mikrostrukturreaktoren kann mit Hilfe bekannter Beschichtungstechniken durch das Einbringen poröser Schichten nochmals um Faktoren vergrößert werden – so dass, wegen der sehr guten Wärmeübertragungseigenschaften und der hohen Druckstabilität und der Wirkung als Flammen- bzw. Explosionssperren, chemische Reaktionen sogar mit explosionsgefährlichen Mischungsverhältnissen durchgeführt werden können. Eine Übersicht über die Herstellung und die Eigenschaften von metallischen Mikrostrukturapparaten ist z.B. in [8] zu finden.

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Mikrostrukturapparaten werden am IMVT auch mit Hilfe der Stereolithographie Mikrostrukturapparate aus Metallen und Polymeren hergestellt. Dieses sogenannte Rapid-Prototyping-Verfahren soll im Folgenden anhand von ausgewählten Beispielen näher erläutert werden.

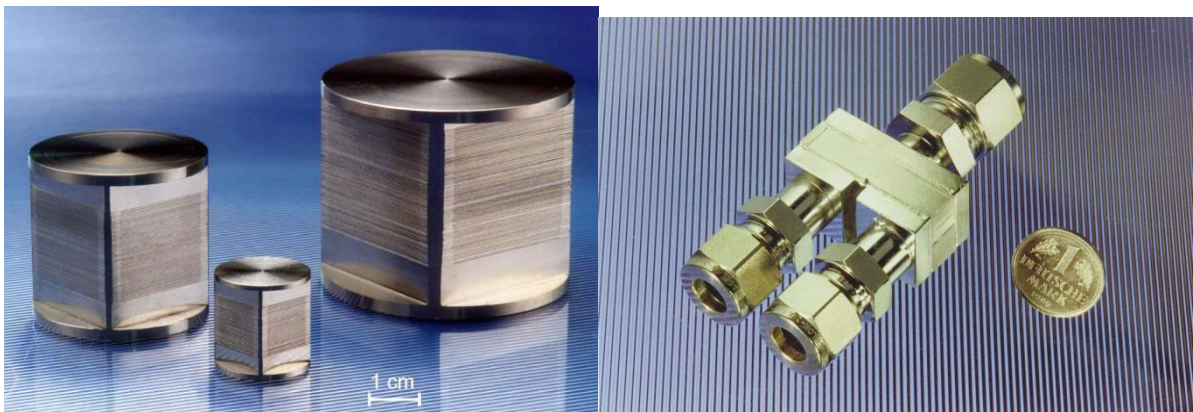


Abb. 1: Photo dreier Kreuzstrom-Mikrowärmeübertrager aus Edelstahl. In einem aktiven Wärmeübertragungsvolumen von 1 cm^3 des kleinsten Apparates können bis zu 20kW thermische Leistung übertragen werden, gemessen mit einem Wassermassenstrom von $700 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ je Passage (8°C kaltes Wasser gegen 95°C heißes Wasser) bei einem Druckverlust von etwa 0.5MPa. Der mittlere Mikrostrukturapparat kann bei einem aktiven Volumen von 8 cm^3 bis zu 60kW übertragen, der größte Mikrostrukturapparat bis zu 200kW bei einem aktiven Volumen von 27 cm^3 und einem Massenstrom von bis zu $7.000 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$

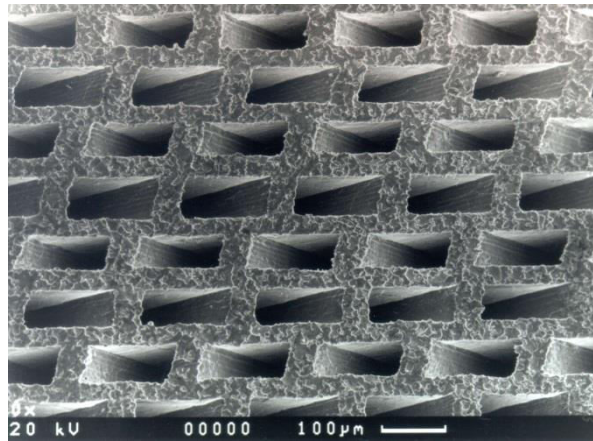


Abb. 2: Photos eines statischen V-Mikromischers. Das obere Teilphoto zeigt eine Ausführung des Mixers in Edelstahl. Der gezeigte Apparat besteht aus schichtweise angeordnete Mikrokanalfolien, die sich am Austritt des Apparates unter einem bestimmten Winkel treffen. Das untere Teilbild zeigt eine REM-Aufnahme der Austrittsfläche. Die einzelnen multilaminieren Fluidströme werden aufgrund der Diffusion sowie einer Wirbelbildung durch Überschneidung sehr schnell miteinander vermischt.

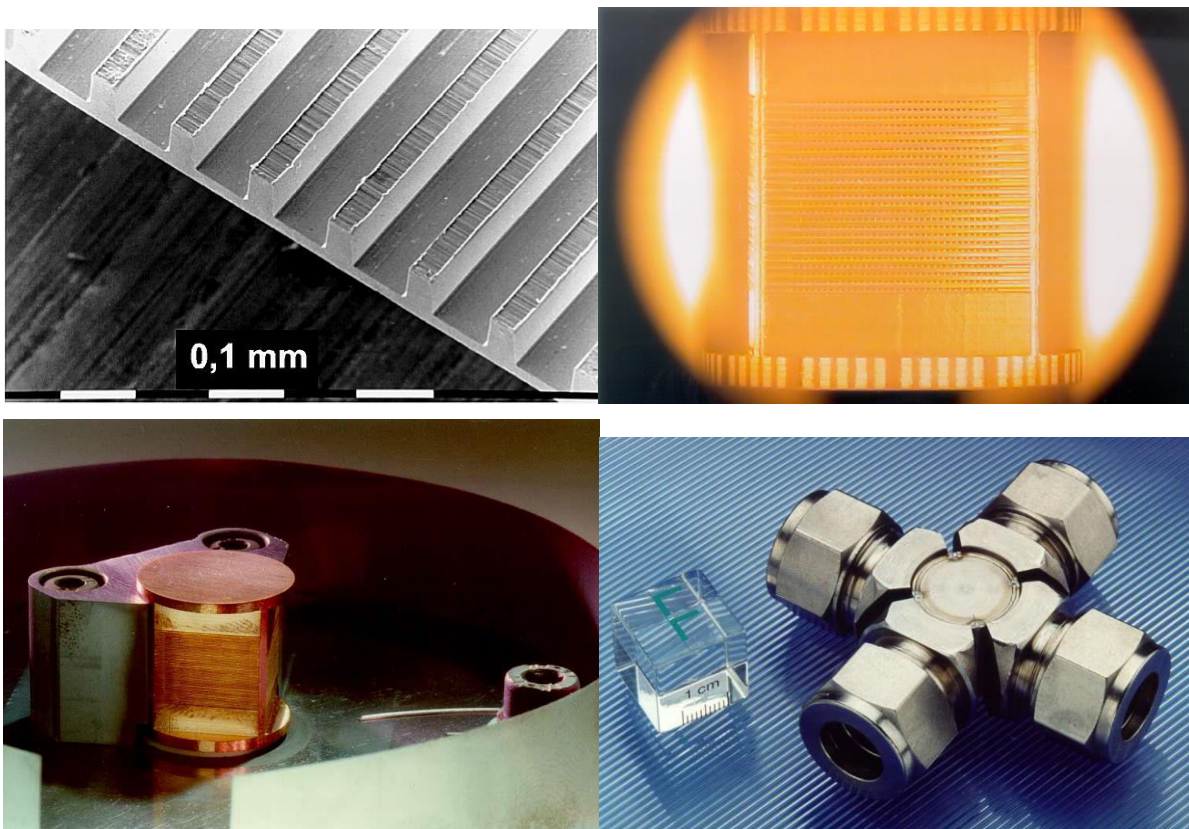


Abb. 3: Methode zur Herstellung von metallischen Mikrostrukturapparaten. Von oben nach unten: Mechanische Mikrostrukturierung. Das Photo zeigt eine Kupfer-Folie mit Kanälen der Breite $100\mu\text{m}$ und der Tiefe $70\mu\text{m}$. Stapeln einer definierten Anzahl solcher Folien in einer Stapelvorrichtung. Anschließendes Diffusionsverschweißen im Vakuum bei genau kontrollierter Temperatur und Presskraft, gefolgt vom Adaptieren von Standard-Verbindungsstücken, z.B. mit Hilfe des Elektronenstrahlschweißens

Rapid Prototyping

(Rapid Prototyping als Begriff für generative Fertigungsverfahren)

Im engeren Sinne wird Rapid Prototyping als Verfahren verstanden, das es erlaubt, nur auf der Basis von Computerdaten dreidimensionale Modelle aus unterschiedlichen Materialien

aufzubauen. Im Vordergrund steht der generative Charakter, der diese Art der Fertigung grundsätzlich von dem abtragenden Charakter konventioneller Fertigungsverfahren unterscheidet [11].

Die Stereolithographie sowie das Selektive Laserschmelzen sind generative Fertigungsverfahren, die am IMVT als Rapid Prototyping Verfahren zum Einsatz kommen.

Die Entwicklung von neuen Mikrostrukturapparaten ist in der Regel sehr zeitaufwendig. Zunächst müssen vorgegebene bzw. angenommene Randbedingungen konstruktiv in ein CAD-Modell umgesetzt werden. Die Prototypenfertigung erstellt dann ein erstes reales Modell bzw. ein Funktionsmodell für den Prüfstand. Die Prüfstandsergebnisse bilden nun die Basis für konstruktive Optimierungen oder Modellvariationen. Dieser Entwicklungskreis wird in der Regel mehrfach durchlaufen, bis ein optimierter, den vorgegebenen Randbedingungen entsprechender Prototyp vorliegt. Mit Hilfe eines Rapid Prototyping Verfahrens ist es möglich, den Zeitaufwand für die Prototypenfertigung auf wenige Tage zu reduzieren. Der Entwicklungskreis wird besonders bei komplexen Geometrien durch den Zeitgewinn bei der Prototypenfertigung sehr viel schneller durchlaufen. Damit ist eine neue Entwicklungsstrategie möglich. Zum Beispiel können unsichere Annahmen bei der Auslegung an einem ersten, eventuell vereinfachten Prototyp auf dem Prüfstand überprüft werden. Der Einsatz von generativen Fertigungsverfahren erlaubt aber auch neue konstruktive Freiheiten, die bisher aus fertigungstechnischen Gründen nicht zulässig oder zu aufwendig waren. Die konsequente Anwendung dieser neuen konstruktiven sowie fertigungstechnischen Freiheiten ermöglicht eine optimale Problemlösung.

Stereolithographie (SL)

Am IMVT wird die Stereolithographie als generatives Fertigungsverfahren zur Herstellung von Mikrostrukturen bzw. Mikrostrukturbauteilen aus Kunststoff eingesetzt. Die Bauteile werden schichtweise aufgebaut. Ein flüssiger Kunststoff wird in dünnen Schichten durch Laserlicht lokal polymerisiert (Photopolymerisation).

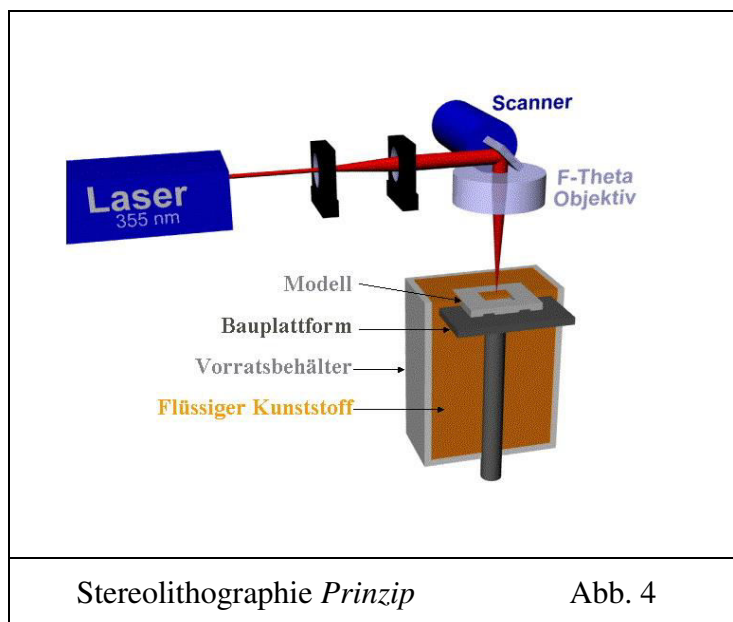


Abb. 4 zeigt das Verfahrensprinzip.

Eine in z-Richtung verschiebbare Bauplattform trägt das zu bauende Modell. Die Bauplattform wird von Schicht zu Schicht um eine definierte Schichtdicke abgesenkt. Danach wird die abgesenkte Schichthöhe mit flüssigem Kunststoff aufgefüllt, auf der vorherigen festen Schicht ist nun eine dünne Schicht aus flüssigem Kunststoff aufgetragen. Anschließend erfolgt die Belichtung der aktuellen Schicht und damit deren Polymerisation.

Die Stereolithographieanlage am IMVT (Abb. 5) wurde speziell zur Herstellung von Mikrostrukturen kontinuierlich weiterentwickelt. So wurde z.B. der Laserspotdurchmesser von ursprünglich 250 μm auf 50 μm reduziert. Mit einem Laserspotdurchmesser von 50 μm können zur Zeit 100 μm breite Kanäle und minimale Wandstärken von 100 μm gebaut werden. Dies entspricht einer Strukturauflösung von 100 μm .



Stereolithographie Anwendungsbeispiele

Die Beispiele (Abb. 6) zeigen, dass auch im Bauteil integrierte Mikrokanalstrukturen mit der Stereolithografiefertigung einfach aufzubauen sind.

Beim Kreuzstromwärmeübertrager hat das Bauteil Kanäle mit einem Querschnitt von 200 µm x 800 µm, die Kanallänge ist 5 mm. Die Messeinrichtung für Verweilzeituntersuchungen hat ebenfalls Kanäle mit einem Querschnitt von 200 µm x 800 µm. Die Bauzeit für einen Kreuzstromwärmeübertrager beträgt etwa 2 Stunden, die Messeinrichtung wurde in etwa 10 Stunden aufgebaut.

Selektives Laserschmelzen (SLM)

Das Selektive Laserschmelzen ist ein generatives Fertigungsverfahren für die Herstellung metallischer Bauteile. Die Bauteile werden schichtweise aufgebaut. Dieser Sichten Aufbau ist prinzipiell vergleichbar mit dem Stereolithographieprinzip. Auf einer Bauplattform wird je Schicht eine dünne Schicht Metallpulver aufgetragen, anschließend wird das Pulver durch Laserstrahlenergie lokal aufgeschmolzen. Die Bauplattform wird um die definierte Schichthöhe abgesenkt, neu beschichtet und wieder lokal aufgeschmolzen. Dieser Vorgang wiederholt sich bis das Bauteil komplett aufgebaut ist.

Abb. 7 zeigt die SLM- Anlage am Institut für Mikroverfahrenstechnik.

Wichtigste Voraussetzung für die direkte Herstellung von Mikrostrukturen durch Laserschmelzen ist eine Strukturauflösung kleiner 100 µm, das heißt, Wandstärken kleiner 100 µm reproduzierbar und *gasdicht* aus Metallpulver aufzubauen bzw. aufzuschmelzen. Die Strukturauflösung und die Bauteildichte werden hauptsächlich vom Energieeintrag und der Belichtungsstrategie beeinflusst. Um den Einfluss dieser Prozessparameter speziell bei der Herstellung von Mikrostrukturbauteilen zu untersuchen und dabei ausreichende Erfahrungswerte zu sammeln werden am IMVT Forschungsarbeiten durchgeführt.

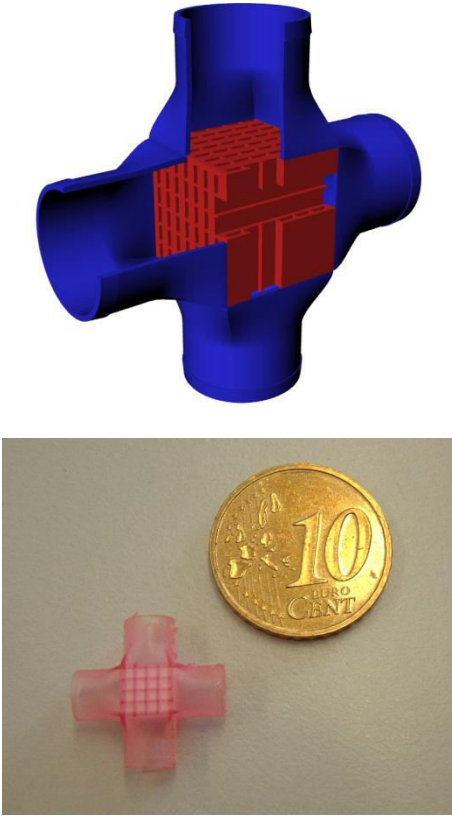
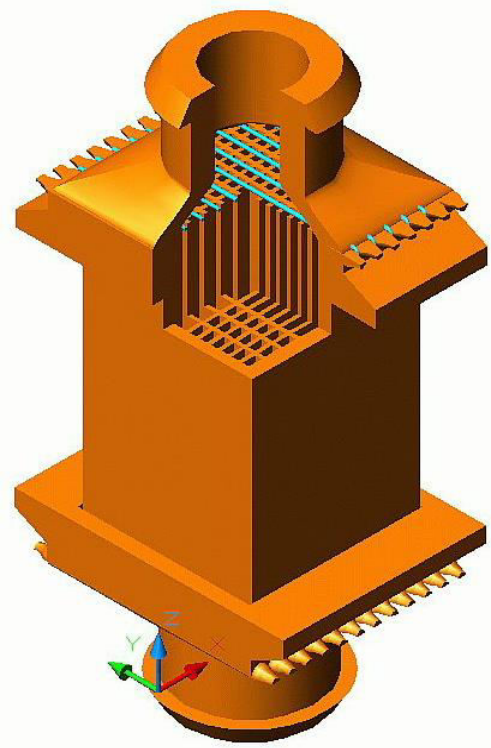
	
Kreuzstromwärmeübertrager (CAD Modell und Stereolithographiebauteil)	Messeinrichtung für Verweilzeituntersuchungen (CAD Modell)

Abb. 6

	<u>Hersteller:</u> F&S GmbH Baujahr : 1999 <u>Technische Daten:</u> Ytterbium Faserlaser, <i>Wellenlänge = 1070nm</i> Abbildungsoptik zur Fokussierung des Laserstrahls auf einen minimalen Spotdurchmesser von 40 μm Galvanometerscanner zur Positionierung des Laserstrahls Positioniergenauigkeit < 5 μm Baufläche: 50x50 mm²
Laserschmelzanlage am IMVT	Abb. 7

Aktuelle Zielsetzung dieser Versuche ist, eine homogene Gefügequalität der aus Metallpulver aufgeschmolzenen Schweißraupen zu erreichen sowie die Oberflächenqualität der Bauteile zu optimieren. Als Werkstoff wird Edelstahlpulver 1.4404 (X2 CrNiMo 17 12 2) mit einer Korngröße von 10 µm bis 30 µm verwendet.

V Versuchsergebnisse

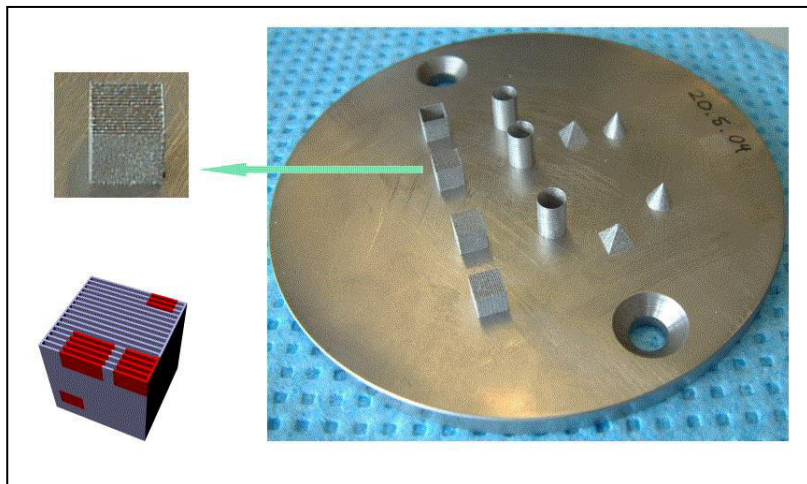


Abb. 8 zeigt eine Bauplattform mit Teststrukturen die aus Edelstahlpulver schichtweise aufgeschmolzen wurden. Pulverschicht betrug 50 µm. Die bisher erreichte Oberflächen- und Schweißraupenqualität wird beispielhaft an einem Mikrostrukturbauteil gezeigt.

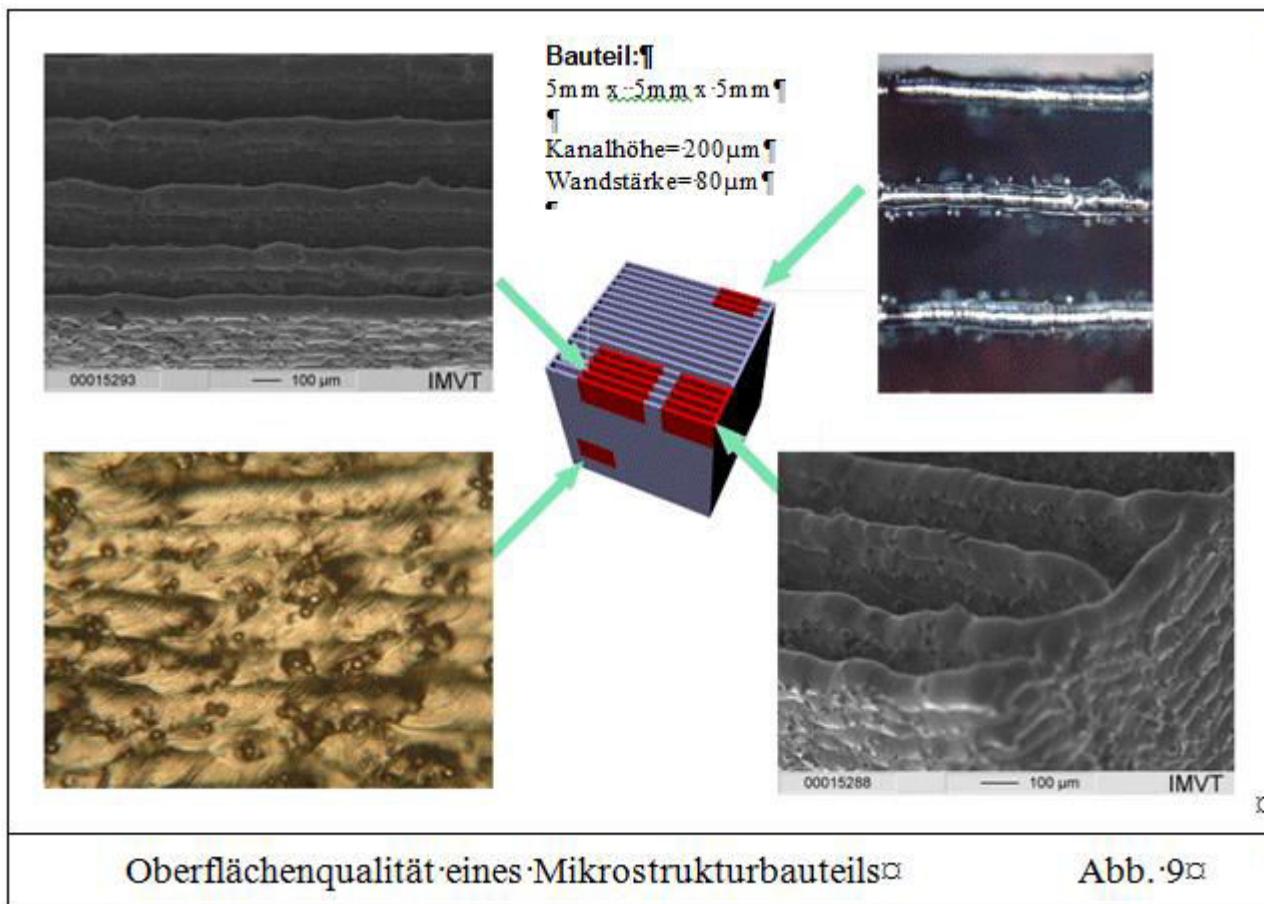


Abb. 9 zeigt eine Übersichtsdarstellung, am CAD-Modell sind die vier Ansichten rot markiert.

Die aktuellen Ergebnisse zeigen fehlerfreie Schweißraupen mit einer Breite von 80 µm und einer Schweißraupenhöhe von 50 µm. An der Oberfläche haften noch einzelne Pulverkörner die teilweise aufgeschmolzen sind. Diese Pulverkörner bedecken weniger als 10% der Oberfläche.

Das selektive Laserschmelzen ist grundsätzlich geeignet zur Herstellung von Mikrostrukturen mit einer Strukturauflösung kleiner 100 µm.

Zusammenfassung

Als Ergänzung zu den klassischen Fertigungsverfahren wird im IMVT die Stereolithographie und das selektive Laserschmelzen zur schnellen Prototypenfertigung eingesetzt. Diese Verfahren haben das Potential, die Strukturauflösung in der Mikrofertigung weiter zu verfeinern.

Literatur

1. Schubert K., Bier W., Linder G., Seidel D., Herstellung und Test von kompakten Mikro-Wärmeübertragern, *Chemie Ingenieur Technik*, 61 (1989), pp. 172-173
2. Henning T., Brandner, J.J., Schubert, K., Characterization of electrically powered micro-heat exchangers, *Chemical Eng. J.* 101 (2004), pp. 339-345
3. Schubert K., Bier W., Brandner J.J., Fichtner M., Franz C., Linder G., Realization and Testing of Microstructure Reactors, Micro Heat Exchangers and Micromixer for Industrial Applications in Chemical Engineering, Proc. of the 2nd Int. Conf. on Microreaction Techn. IMRET 2, March 9-12, 1998, New Orleans, LA, USA, pp. 88-95
4. Pfeifer P., Schubert K., Liauw M.A., Emig G., Electrically Heated Microreactors for Methanol Steam Reforming, *ICHEME*, Vol. 81, Part A, 2003, pp.711-720
5. Reuse P., Renken A., Haas-Santo K., Görke O., Schubert K., Hydrogen Production for fuel cell application in an autothermal micro-channel reactor, *Chem. Eng. J.* 101 (2004), pp. 133-141
6. Görke O., Pfeifer P., Schubert K., Water gas shift reaction and selctive oxidation of CO in microreactors, *Appl. Cat. A* 263 (2004), pp. 11-18
7. Brandner J.J., Emig G., Liauw M.A., Schubert K., Fast Temperature Cycling in microstructure devices, *Chem. Eng. J.* 101 (2004), pp. 217-224
8. Schubert K., Brandner J.J., Fichtner M., Linder G., Schygulla U., Wenka, A., Microstructure Devices for Applications in Thermal and Chemical Engineering, *Microscale Thermophysical Eng.*, Vol. 5, No. 1, 2001, pp. 17-35
9. Pfeifer P., Schubert K., Liauw M.A., Emig G., PdZn catalyst prepared by washcoating microstructured reactors, *Appl. Cat. A* 270 (2004), pp. 165-175
10. Ikuta K., Hasegawa T., Adachi T., Maruo S., Proc. of the IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'2000), (2000), p.739 ff.
11. Gebharth A., Rapid Prototyping, Hansa Verlag, München 1996.

© E. Anurjew, J.J. Brandner, E. Hansjosten, U. Schygulla, K. Schubert, 2005

УДК 681.786.004.414.28::(62+167/168)

*Ю.В. Чугуй, А.Г. Верхогляд, И.В. Голубев, В.П. Кирьянов,
К.И. Кучинский, Ю.В. Обидин, С.В. Плотников, М.Ф. Ступак,
Е.В. Сысоев, Л.В. Финогенов, В.П. Юношев*
КТИ НП СО РАН, Новосибирск

3D ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ НАУЧНЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Увеличению роста промышленного производства в России в последние годы, несомненно, способствует использование новых технологий – технологий XXI века. Использование новой элементной базы переводит на качественно другой уровень измерительные технологии. Среди измерительных технологий наиболее перспективными являются **оптико-электронные измерительные технологии**, в которых достижение целей измерения обеспечивается использованием методов и средств современной оптики, электроники и компьютерной техники [1, 2].

Особое место занимают **оптико-электронные измерительные технологии для размерного контроля**, ориентированные на получение количественной информации о геометрических параметрах объектов и их

изменениях в пространстве и времени. При контроле геометрических параметров объектов измеряются: линейные и угловые размеры, форма, расположение поверхностей. В случае контроля положения объектов (или его частей) проводятся измерения: линейных расстояний от базы сравнения до характерных точек объекта и угловых характеристик. Объекты можно классифицировать по оптическим свойствам. Это объекты с четкой теневой проекцией и корпусного типа. При чёткой теневой проекции применяются **методы** контроля **в проходящем свете** (теневой, дифракционный и др.). В случае объектов корпусного типа используются методы контроля в рассеянном свете: триангуляционный, на основе структурного освещения, низкокогерентной интерферометрии и др.

Применение **оптико-электронных измерительных технологий** позволяет:

- Повысить качество и конкурентоспособность выпускаемой продукции;
- Решить ряд актуальных жизненно важных проблем (повышение безопасности атомной энергетики, безопасности ж/д транспорта и т.д.).

К современным автоматическим оптико-электронным измерительным системам и технологиям предъявляются следующие основные требования:

- Бесконтактность и дистанционность измерений;
- Широкий диапазон измерений – от 1 мкм до 1 м и более;
- Высокое разрешение – от 1 нм до 1 мкм;
- Высокое быстродействие – от 10^3 до 10^5 измер./с.;
- Промышленное исполнение (климатическое исполнение по требованию заказчика);
- Конкурентоспособность (на мировом рынке);
- Наличие сертификата;
- Наличие эксплуатационной документации;
- Гарантийное и постгарантийное обслуживание;
- Приемлемая цена.

За последние 10 лет в КТИ НП СО РАН была разработана гамма измерительных систем и технологий для базовых отраслей страны [2], таких как атомная энергетика [3], железнодорожный транспорт, оптико-механическая и горнодобывающая промышленность. Наша Hi-Tech продукция - это синтез современной оптики (включая киноформную), точной механики (разрешение 1 нм – 1 мкм), лазерной оптики, современной электроники и компьютерной техники, программного обеспечения, конструкторской и эксплуатационной документации.

В течение последних двух лет было выпущено более десятка наименований изделий, причём некоторые - тиражом в десятки и сотни экземпляров.

Остановимся подробнее на некоторых основных разработках КТИ НП.

Оптико-электронная система промышленного размерного контроля изделий типа тел вращения ГРАД-2 (Рис. 1) предназначена для

автоматизированного бесконтактного измерения геометрических параметров изделий типа тел вращения.

Принцип действия системы основан на измерении геометрических параметров изделия по их теневым изображениям. Высокая точность и достоверность измерения геометрических параметров обеспечивается использованием оригинальных алгоритмов цифровой обработки сигнала. Погрешность при измерении внешних диаметров составляет ~ 4 мкм. Время измерения



Рис. 1. Внешний вид системы ГРАД-2

одной детали (≈ 30 параметров) не более 15 сек. Система выполнена в виде четырех автоматизированных рабочих мест: АРМ контролера ОТК, АРМ конструктора, АРМ технолога и АРМ мастера КИП. Особенностью системы является возможность расширения списка измеряемых изделий путем создания чертежа детали при помощи стандартных средств автоматизированного проектирования. Чертеж подвергается обработке специальной программой и используется для выработки стратегии контроля. Наглядность получаемой информации об измеряемых параметрах изделия делает систему также незаменимым помощником технолога при отладке и проверке производственных технологических процессов.

Оптико-электронная лазерная измерительная машина (ЛИМ) контроля основных геометрических параметров дистанционирующих решеток предназначена (Рис. 2) для автоматического бесконтактного 3D контроля геометрических параметров дистанционирующих решеток (ДР)



Рис. 2. Внешний вид ЛИМ

тепловыделяющих сборок ядерных реакторов (количество ячеек > 300 шт.).

Принцип действия лазерной измерительной машины основан на анализе изображений ячеек ДР, освещенных тремя матрицами в виде 12×13 световых пучков (метод многоточечного структурного освещения, рис. 3). Рассеянный поверхностями ячейки свет воспринимается тремя ПЗС камерами, сигнал с которых передается в

компьютер для вычисления геометрических параметров ячейки.

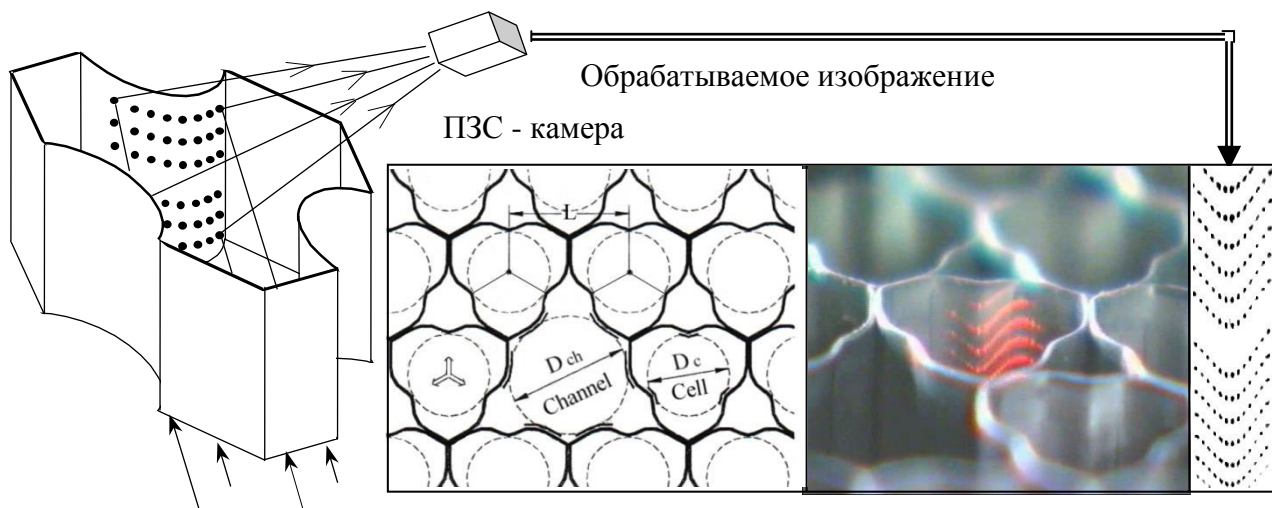


Рис. 3. Метод многоточечного структурного освещения

Использование двухкоординатного прецизионного сканирующего стола позволяет получить информацию о всех ячейках ДР и ее геометрии в целом.

Лазерная измерительная машина, разработанная КТИ НП СО РАН [4], производит измерение ДР за 12 минут (каждый элемент измеряется в 16 сечениях), что в 300 раз быстрее, чем у современной контактной КИМ. Кроме того, данная машина использует бесконтактные способы контроля, что, несомненно, повышает качество и точность измерений (см. в качестве примера рис. 4).

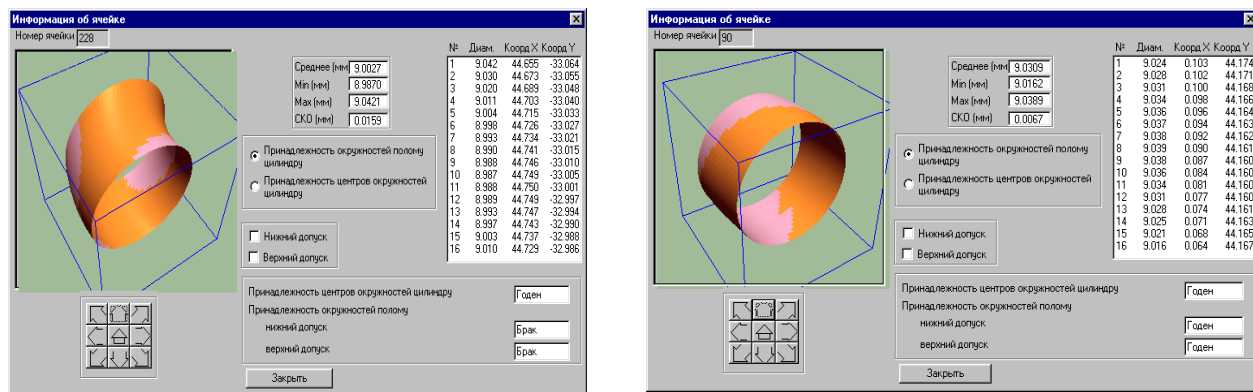


Рис. 4. Реконструкция на экране монитора 3D-конфигурации бракованной (справа) и годной (слева) ячейки ЦДР

Система дефектоскопии урансодержащих таблеток ДЕФЕКТ предназначена для обнаружения и распознавания поверхностных дефектов топливных таблеток и их автоматической отбраковки (Рис. 5).

В основу метода измерения положено формирование путем специального освещения высококонтрастных изображений поверхностей таблетки, ввод их в



Рис. 5. Внешний вид системы ДЕФЕКТ

обнаружения дефекта – 95%. Проведенные исследования работы системы при контроле реальной продукции в ОАО «НЗХК» показали обоснованность принятых научно-технических решений.

Опτικο-электронная система измерения поверхностных дефектов ПРОФИЛЬ. Принцип действия системы основан на использовании интерференции частично-когерентного света. При измерении производится

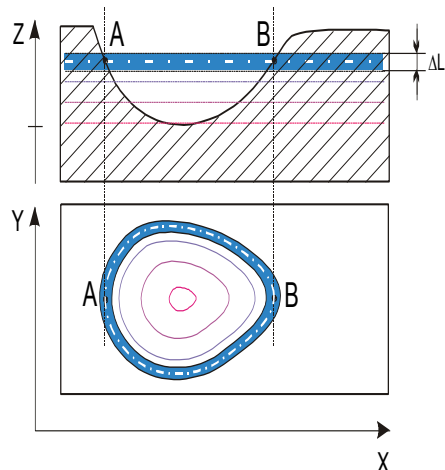


Рис. 6. Набор изолиний при сканировании дефекта

ЭВМ с помощью матричных фотоприемников на ПЗС и обработка в реальном времени.

На базе разработанных метода и программного обеспечения (совместно с ИМ СО РАН) впервые в мире создана система дефектоскопии урансодержащих таблеток с производительностью в темпе конвейера при минимальном размере обнаруживаемого дефекта 100 мкм и вероятностью

автоматическое сканирование по глубине профиля поверхности, содержащей дефект. В результате сканирования получается набор изолиний профиля измеряемого участка поверхности (см. рис. 6). По этому набору изолиний рассчитывается профиль этого участка поверхности. Применение прямого метода измерений, при котором регистрируются непосредственно координаты точек поверхности, позволяет обеспечить высокую точность и достоверность результатов [5].

На рис. 7 приведен пример отображаемой на экране монитора информации при измерении дефектов системой ПРОФИЛЬ.

Технические характеристики системы ПРОФИЛЬ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Площадь	2.3 × 2.3 мм
Разрешение по глубине	1 мкм
Погрешность измерения по глубине	5 мкм
Диапазон по глубине Z	≤ 10 мм
Время измерения	< 15 с (глубина 50 мкм)

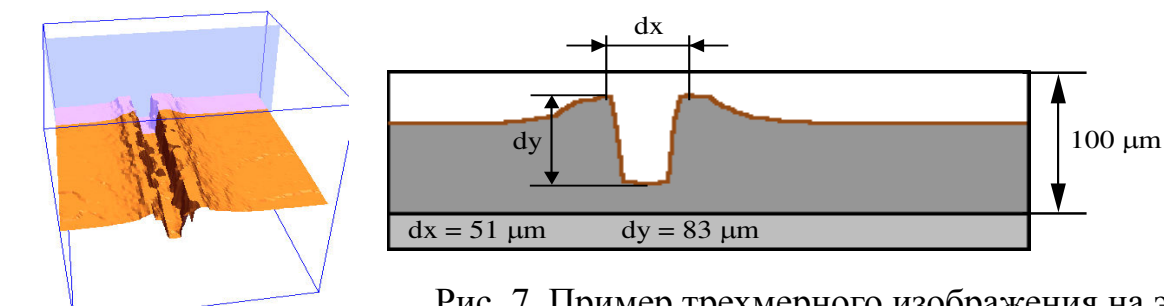


Рис. 7. Пример трехмерного изображения на экране монитора дефекта типа «риска» (слева) и его количественные характеристики в выбранном сечении

Автоматизированный диагностический комплекс для бесконтактных измерений параметров колесных пар вагонов КОМПЛЕКС предназначен для выявления на ходу поезда износов и дефектов цельнокатанных колес (см. рис. 8), а также роликовых букс, имеющих разрушения торцевого крепления, их регистрации и оперативной передачи информации на ближайшую станцию ПТО с целью обеспечения безопасной эксплуатации грузовых вагонов.



Рис. 8. Внешний вид системы КОМПЛЕКС (слева) и принцип автосканирования геометрических параметров колесной пары системой (справа)

Принцип действия системы основан на лазерном бесконтактном контроле геометрии движущихся трехмерных объектов с помощью триангуляционных датчиков положения.

Технические характеристики комплекса позволяют производить измерения на скоростях движения поезда от 20 до 60 км/час.

Система обязана контролировать следующие параметры колесных пар грузовых вагонов:

- Ширину обода;
- Толщину обода от 18 до 80 мм;
- Толщину гребня от 20 до 33 мм;
- Сумму толщин гребней на оси;

- Диаметр по поверхности катания от 844 до 964 мм;
- Расстояние между внутренними гранями колес от 1437 до 1443 мм;
- Равномерный прокат от 0 до 10 мм;
- Разность диаметров колес в колесной паре.

Погрешность измерений линейных размеров – до 0,5 мм, рабочий интервал температур от –50 до +50°C. В качестве примера на рис. 9 приведен статистический анализ измеренных параметров толщины обода по более чем 200 000 значений.

В настоящее время ведутся работы по доводке системы КОМПЛЕКС для контроля ползунов, наваров, неравномерного проката. На сегодняшний день данные системы эксплуатируются на Московской железной дороге (2 ед.), Западно-Сибирской железной дороге (5 ед.) и по одной системе введены в эксплуатацию на Красноярской, Восточно-Сибирской и Забайкальской железных дорогах.

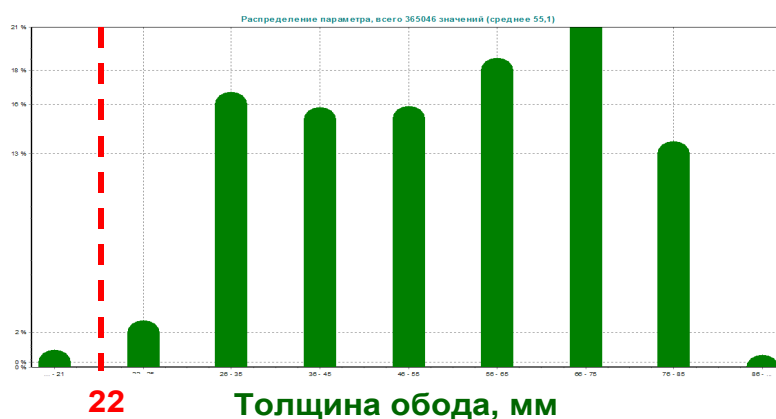


Рис. 9. Статистический анализ измеренных параметров толщины обода прошедших поездов. Процент колес с толщиной обода меньше 22 мм – 0,6%

Система

автоматизированного контроля рассеивающих пластин СИТО предназначена для технологического контроля размеров отверстий и их межцентровых расстояний в ситовом полотне (см. рис. 10). Система может использоваться в различных отраслях промышленности для контроля аналитических сит.

Технические характеристики системы СИТО приведены в табл. 2.

Таблица 2

Диаметр контролируемых рассеивающих пластин	не более 200 мм
Диаметр измеряемых отверстий	от 1 до 5,5 мм
Погрешность измерения диаметра отверстия	± 3 мкм
Диапазон перемещений стола по осям X и Y	0 - 200 мм
Погрешность отсчета позиции стола	± 20 мкм
Погрешность измерения межцентровых расстояний	± 40 мкм
Время измерения одного отверстия	не более 1 с
Время перемещения в соседнюю позицию	не более 2 с

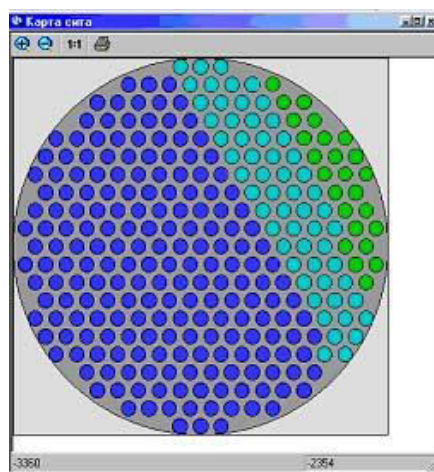


Рис. 10. Внешний вид системы СИТО (слева) и пример результата измерения образца сита на экране монитора (справа), где для наглядности диапазоны измеренных диаметров отверстий отображены разными цветами

Лазерный генератор изображений CLWS-300/C-M предназначен для синтеза прецизионных хромовых шаблонов или мастер – оригиналов (в том числе - оптических элементов нового поколения для оптических измерительных систем), обеспечивающий запись на криволинейных поверхностях (Рис. 11).



Принцип действия: с помощью сфокусированного лазерного излучения формирование в пленках хрома скрытого изображения фотошаблонов будущих оптических элементов. Основные технические параметры лазерного генератора изображений показаны

Рис. 11. Внешний вид лазерного генератора изображений CLWS-300/C-M в табл. 3.

Таблица 3

Диаметр заготовок	20...300 мм
Пространственное разрешение	до 1000 лин./мм
Разрешение по R координате	не хуже 10 нм
Разрешение по φ координате	не хуже 0.25 угл. с
Диапазон перемещения по Z координате	до 25 мм
Погрешность автофокусировки	± 0,05 мкм
Светочувствительный слой	пленка хрома, фоторезист
Материал	стекло, кварц



Рис. 12. Примеры записей, сделанных с помощью CLWS-300/С-М: слева - дифракционная структура на элементе сферической поверхности, диаметр подложки - 50 мм, радиус кривизны - 240 мм, справа - тестовое изображение для исследования процесса записи по хрому (диаметр 350 мкм, минимальные размеры элементов 10 мкм × 10 мкм)

Технико-экономические преимущества лазерного генератора изображений CLWS-300/С-М - это большое рабочее поле, высокие разрешение и производительность, простота и дешевизна технологии при изготовлении высокоточных круговых шкал и лимбов (число штрихов до 360000, погрешность изготовления ~ 1 угл.с), многоразрядных преобразователей «угол-код» (число двоичных разрядов до 18), элементов дифракционной оптики (см. рис. 12 - осесимметричных, внеосевых и произвольной топологии, в т.ч. линейных структур), синтез узлов и элементов микромеханики.

Автоматизированный комплекс нелинейно-оптической диагностики (НОД) диэлектрических и полупроводниковых структур. На основе компьютерного анализа сигнала второй гармоники проходящего через исследуемый образец зондирующего лазерного излучения комплекс позволяет получать карты кристаллического совершенства приповерхностного слоя и объема диэлектрических и полупроводниковых пластин и пленок (в частности — сегнетоэлектрических монокристаллов и пленок, полупроводниковых структур на основе GaAs, CdTe, InAs и т.д.), регистрировать угловые зависимости поляризации сигнала второй гармоники в

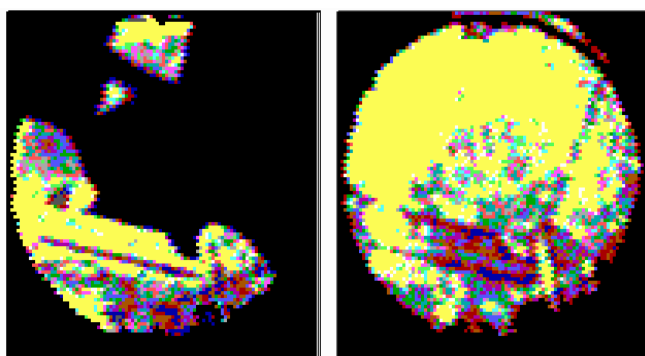


Рис. 13. Карты приповерхностных кристаллических свойств (слева) и оптического качества объема (справа) монокристаллической подложки CdTe, имеющей блочную структуру

различных точках образца и по их компьютерному анализу определять в локальной точке абсолютную ориентацию кристаллографических осей относительно плоскости среза образца или поверхности пленки.

На рис. 13 в качестве примера приведены карты приповерхностных кристаллических свойств (слева) и оптического качества объема (справа) монокристаллической подложки теллурида кадмия, имеющей блочную структуру. Каждый блок хорошо читается на карте поверхности (участки разной степени потемнения), ориентация его осей легко устанавливается комплексом; карта объема демонстрирует наличие значительных напряжений (темные области внутри светлого круга, соответствующего площади подложки, на правой карте) в ряде участков сочленения блоков.

Комплекс НОД зарекомендовал себя в качестве эффективного экспрессного диагностического средства как в цеховых условиях, так и в лабораторных исследованиях при создании новых материалов микро- и оптоэлектроники.

Лазерный технологический многофункциональный комплекс LSP-2000. Разработан и создан уникальный многофункциональный лазерный технологический комплекс, не имеющий мировых аналогов по совокупности рабочих характеристик (см. рис. 14). Его отличительные особенности - в примененных конструктивных и технических решениях (в частности - использован принцип «летающего» лазера), позволивших реализовать рекордную совокупность рабочих характеристик.



Рис. 14. Внешний вид комплекса LSP-2000 (справа) и крупным планом - головка лазерного исполнительного элемента (слева)

Комплекс позволяет производить обработку большеразмерных изделий (максимальный размер $3000 \times 3000 \times 600$ мм³) с **произвольной 3D-формой поверхности**. Реально достигнутая неопределенность позиционирования исполнительного элемента при работе в старт-стопном режиме – не более 5 мкм. Отклонение траектории движения исполнительного элемента от заданной при непрерывном движении не превышает 20 мкм. Комплекс оснащен двумя отечественными лазерами, один из которых - МЛТИ-500 - позволяет производить резку металлических изделий с толщиной стенок до 6 мм и сварку тонкостенных металлических изделий, а второй – оригинальной конструкции, благодаря высокой импульсной мощности излучения ($> 3 \cdot 10^6$ Вт) при частоте следования импульсов 300 Гц обеспечивает микропрофилирование поверхности

с высокой точностью (совместная разработка с ИЛФ СО РАН). Управление комплексом производится с помощью 6-ти координатной системы ЧПУ. Программное обеспечение позволяет производить ввод задания в виде чертежа, подготовленного в системе автоматического проектирования AutoCad-2000, а также - производить восстановление неизвестной заранее формы обрабатываемой поверхности с заданной точностью по реперным точкам, т.е. использовать его в качестве уникальной контрольно-измерительной машины.

Заключение

Высококвалифицированный персонал, экспериментальная база и действующее опытное производство позволяют Институту в сжатые сроки выполнять НИОКР по созданию образцов принципиально новой конкурентоспособной техники на основе оптических, лазерных и информационных технологий, осуществлять изготовление, поставку, монтаж «под ключ» и гарантийное обслуживание разработанных систем и приборов. В результате – долговременное плодотворное сотрудничество с базовыми отраслями страны и солидными зарубежными партнерами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gordon M.Brown, Kevin G. Harding, H. Philip Stahl. Industrial Application of Optical Inspection, Metrology, and Sensing. Proc. SPIE, 1821, 1992.
2. Чугуй Ю.В. Информационные, оптические и лазерные технологии в КТИ НП СО РАН: состояние и перспективы. Автометрия, 1997, № 4, С. 3-15.
3. От первой в мире АЭС - к атомной энергетике XXI века: сборник тезисов, докладов и сообщений 10-й Ежегодной Конференции Ядерного Общества России. 28 июня - 2 июля 1999. Издательство Rity «ФЭН», 1999.
4. O.I. Bityutsky, et al. Laser Measuring Machine for 3D Noncontact Inspection of Geometric Parameters of Grid Spacers for Nuclear Reactors VVER-1000. Proc. SPIE, vol. 4900, 2002, pp. 202–212.
5. Ye.V. Sysoev, I.A. Fomicheva, I.V. Golubev, Yu.D. Makashev, P.A. Orekhov, V.A. Shakhmatov, L.M. Stepnov. Interference systems for 3D surface profiling and analysis using partially coherent light. Proc. SPIE, vol. 4900, 2002, pp. 213–219.

© Ю.В. Чугуй, А.Г. Верхогляд, И.В. Голубев, В.П. Кирьянов, К.И. Кучинский, Ю.В. Обидин, С.В. Плотников, М.Ф. Ступак, Е.В. Сысоев, Л.В. Финогенов, В.П. Юношев, 2005

**УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ.
СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**

Лазерные информационные системы для связи при отсутствии прямой видимости между объектами

При распространении лазерного излучения в чистой атмосфере без молекулярного и аэрозольного рассеяния, доступ к сигналу осуществляется только при размещении фотоприемника в сечение лазерного пучка, то есть только при прямой видимости между абонентами. При распространении ультрафиолетового лазерного излучения в атмосфере, наблюдается постоянное молекулярное рассеяние сигнала, позволяющее принимать его вне зоны прямой видимости. Зона связи в этом случае определяется индикатрисой молекулярного рассеяния и позволяет принимать сигнал за препятствиями. Экспериментальное подтверждение возможности создания скрытных линий связи в диапазоне 0,2-0,38 мкм было получено в СССР в 80-х годах в ИРЭ АН СССР и в ИГД СОАН. В США разработаны образцы ультрафиолетовой связи специального назначения на дальность до 5 км. В России в ИЛФ СО РАН созданы и испытаны в 2002 г. первые образцы УФ информационных систем с использованием молекулярного рассеяния. Основной проблемой в этом диапазоне является отсутствие надежных и недорогих лазерных источников ультрафиолетового излучения. Поэтому сейчас ведется разработка полупроводниковых и эксимерных УФ излучателей для информационных систем. В качестве приемников УФ сигналов используются, как фотоэмиссионные, так и полупроводниковые фотоприемники. В ИЛФ СО РАН разработаны УФ фотоприемники как на диодах с барьером Шоттки, так и полимерные волноводные преобразователи УФ сигналов в видимый или инфракрасный диапазон с увеличением яркости сигналов. Быстродействие таких преобразователей зависит от вида используемого люминофора и может достигать долей наносекунд.

Лазерные информационные системы для определения координат объектов при отсутствии прямой видимости между объектами

Лазерные системы широко используются в геодезических задачах по определению расстояний, углов и перемещений объектов. Однако непременным условием функционирования геодезических лазерных систем является наличие прямой видимости между источником излучения и измеряемым объектом. Вместе с тем для топологической привязки объектов, для определения направления и расстояния до объектов без их прямой видимости может использоваться явление рассеяния лазерного излучения в атмосфере. Впервые работы по использованию лазерных маяков в атмосфере были начаты в восьмидесятые годы прошлого столетия [1]. Экспериментально, на основе рэлеевского рассеяния были созданы лазерные маяки на высотах 6-20 км и с использованием резонансного рассеяния в натриевом слое на высоте 90 км. Эти маяки применялись для исследований по адаптивной оптике. Ряд теоретических

вопросов применения загоризонтных лазерных систем для определения координат наземных объектов рассмотрен в работе [2].

Вопросы построения лазерных линий с использованием рассеяния в атмосфере рассмотрены в работах [3,4]. Остановимся на некоторых экспериментальных результатах полученных нами по угловым характеристикам рассеянных лазерных и широкополосных ультрафиолетовых (УФ) сигналов на трассах до 2 км без прямой видимости между излучателем и фотоприемником.

Общая схема размещения излучателей и приемников представлена на рис.1., где указаны угловые характеристики излучателей и фотоприемников. При экспериментах с лазерным излучением наблюдалось в основном молекулярное рассеяние в чистой атмосфере в так называемой солнечно-слепой зоне на длинах волн менее 0,29 мкм, где величина фоновой помехи становится минимальной за счет поглощения солнечного УФ излучения озоновым слоем в атмосфере. Величина молекулярного рассеяния обратно пропорциональна четвертой степени длины волны, а индикатриса рассеяния определяется выражением [4]:

$$x(\gamma) = \frac{3}{4} (1 + \cos^2 \gamma).$$

В условиях эксперимента лазерный источник находился вне прямой видимости для приемника (за соседним зданием) и луч направлялся под углом 10 градусов к горизонту. В месте расположения приемника на расстоянии 1 км от источника излучения луч проходил на высоте более 100 метров, там же привеле. Из проведенных экспериментов на трассах до 2,2 км следует, что направление на источник излучения может надежно определяться при отсутствии прямой видимости между излучателем и приемником. При этом точность определения направления на источник излучения зависит от угла поля зрения и типа приемника, так при использовании координатных фотоприемников можно ожидать получение точности до нескольких угловых минут.

Из проведенных экспериментов следует, что для УФ диапазона определяющее влияние на рассеяние составляет молекулярное рассеяние при МДВ более 3 км. При появлении аэрозольного рассеяния, можно ожидать более вытянутую индикатрису рассеяния [5] и в свою очередь увеличения точности определения направления на источник излучения. Представляет интерес также возможность определения расстояния от приемника до такого невидимого УФ излучателя. Первая возможность связана с синхронизацией источника УФ излучения и приемника внешним высокостабильным импульсным генератором, что соответственно позволит определить время распространения и соответственно расстояние до излучателя. Однако для высокой точности определения расстояния необходимо иметь достаточно короткие лазерные импульсы. Необходимо также учитывать траекторию распространения лазерного излучения и кратность рассеяния принятых фотонов. Дополнительную информацию о расстоянии до объекта, где установлен УФ излучатель можно получить также за счет анализа геометрических характеристик контролируемой зоны рассеяния и величины принятого сигнала. В частности ясно, что при удалении от объекта будет соответственно

увеличиваться эта зона за счет расходимости лазерного пучка, при этом необходимо учитывать угол наклона луча излучателя и поля зрения приемника.

УФ лазерные информационные системы при прямой видимости между объектами

УФ диапазон перспективен для построения информационных систем при прямой видимости между объектами. Развиваются как наземные информационные системы для контроля характеристик атмосферы, так и телекоммуникационные системы. Интерес к таким системам обусловлен как уменьшением фоновых помех от Солнца, так и ростом пропускной способности и эффективности передачи информации.

Так при создании в будущем лазерной системы связи Земля - Луна эффективность линии будет зависеть от размера лазерного пятна. Размеры лазерного пятна на поверхности Луны при разных длинах волн и углах расходимости представлены в табл. 1.

Таблица 1

Длина волны	Диаметр пучка	Угол дифракционной расходимости $\gamma = 1.22\lambda/d$	Диаметр пятна на Луне
УФ 0,2 мкм	10 см	$2,4 \cdot 10^{-6}$ рад	900 м
	1 м	$2,4 \cdot 10^{-7}$ рад	90 м
ИК 1,06 мкм	10 см	$1,3 \cdot 10^{-4}$ рад	4900 м
	1 м	$1,3 \cdot 10^{-5}$ рад	500 м

Из данной таблицы следует, что в УФ диапазоне можно получить облученность лунных лазерных приемников почти в 10 раз большую, чем в ИК диапазоне, при одинаковой мощности лазерных передатчиков. При этом необходимо также учесть, что уровень УФ фоновых помех более чем в десять раз меньше, чем ИК помехи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бакут П.А., Камчатов В.Б., Маркина О.М. и др. Искусственные маяки в адаптивных оптических системах. Заруб. радиоэлектроника, 4, 1995.
2. Павлов В.Г., Проскурин Н.Г., Сидоров Ю.В., Толстых Н.Н. Оценка возможности применения лазерных загоризонтных систем для определения координат наземных объектов. Труды 7 Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация и связь», Воронеж, ВГУ, 2001, том 2, с.1246 – 1252.
3. Багаев С.Н., Беляков В.Г., Поллер Б.В. Методы построения лазерных сетей связи в атмосфере с аэрозолями. Труды научно-технической конференции «Радио и волоконно-оптическая связь, локация и навигация», Воронеж, ВГУ, 1997, том 3, с.1126 – 1237.
4. Поллер Б.В., Федоров Б.В., Щетинин Ю.И. Об эффективности передачи сообщений в атмосферных оптических каналах связи с рассеянием. Труды международной НТК «Радиолокация, навигация, связь» Изд-во НПФ «Саквее» Воронеж, 2003 г. Т.1. с.403 – 406.
5. Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. и др. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. Наука, Новосибирск, 1986.

© Б.В. Поллер, 2005

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТРОЛОГИИ УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты международного семинара по современному состоянию метрологии угловых измерений, прошедшего в ноябре 2003 г. в РТВ (Германия) [1], показали, что в мировой практике метрологии угловых измерений в последнее время наблюдается переход к использованию поворотных столов с фотоэлектрическими преобразователями угла (ФЭП) высокого разрешения в сочетании с работой в динамике, что обеспечивает практически непрерывное воспроизведение переменного плоского угла.

Если на предыдущем этапе развития в основе большинства национальных эталонов использовались поворотные столы с двумя автоколлиматорами и многогранной призмой (МП) или столик Мура с автоколлиматором и МП, то в последнее время наблюдается переход к использованию столов с фотоэлектрическими преобразователями угла (ФЭП), характеризующимися обычно дискретом (без интерполяции фазы выходного сигнала) порядка 30 угл.с. Использование интерполяционной техники уменьшает дискрет до величин порядка нескольких сотых угловой секунды. В ряде случаев (например, в эталонной установке Германии [1, 2] и Японии [1, 3]) используются ФЭП, специально разработанные для данных установок и имеющие дискрет порядка нескольких угловых секунд. Построение эталонов на базе ФЭП позволяет полностью автоматизировать процесс воспроизведения угла и добиваться при этом разрешающей способности эталонной установки на уровне сотых и тысячных долей угловой секунды за счет использования интерполяции выходного сигнала ФЭП.

Эталонные установки такого типа значительно лучше отвечают требованиям единства измерений, поскольку все более широкое применение в промышленности и оборонной технике находят высокоточные и высокочувствительные цифровые преобразователи угла (ЦПУ). При этом важным обстоятельством является то, что ряд преобразователей угла работает, как в статике (для измерения постоянных значений угла), так и в динамике (для измерения переменных во времени значений угла), а некоторые ЦПУ предназначены только для использования в динамике. Это приводит к необходимости расширения функциональных возможностей эталонных установок – они должны обеспечивать воспроизведение единицы плоского угла, как в статике, так и в динамике.

Существующий Государственный первичный эталон единицы плоского угла ГОСТ 8.016-81 обеспечивает воспроизведение постоянных значений плоского угла и передачу размера единицы угла главным образом рабочим средствам измерения постоянных значений плоского угла [4]. При этом метрологическое обеспечение средств измерения переменных значений плоского угла не соответствует современным требованиям. В связи с этим было принято решение о разработке (в рамках работ по созданию нового эталона единицы ускорения) эталонной установки, предназначенной для

воспроизведения единицы переменного плоского угла (плоского угла при вращательном движении твердого тела).

При проведении данной работы был использован опыт разработки и метрологического применения лазерных динамических гониометров. Использование в созданном эталоне динамического лазерного гониометрического метода обеспечивает в конечном итоге, поверку как рабочих средств измерений плоского угла, работающих в динамическом режиме, так и высокопроизводительную и экономически эффективную поверку некоторых средств измерения постоянного плоского угла. Это позволяет осуществлять поверку рабочих средств измерений непосредственно на государственном эталоне.

Принцип действия лазерных гониометров основан на использовании вращающегося с постоянной скоростью КЛ в качестве эталонного углового лимба, с чрезвычайно высокими разрешением и равномерностью следования штрихов [5]. Данный метод открывает наиболее благоприятные условия для достижения предельных точностных характеристик КЛ. Измерительные технологии, используемые в современной лазерной динамической гониометрии, позволяют оценить ее потенциальные возможности, определяемые квантовыми флуктуациями выходного сигнала КЛ, на уровне нескольких тысячных долей угловой секунды.

Результаты исследований показали [6], что основным источником случайной погрешности КЛ являются квантовые и широкополосные технические флуктуации выходного сигнала КЛ. Обычно максимальное значение дисперсии этих флуктуаций не превышает $0,0025 \text{ (угл.с)}^2$, т.е. $\sigma < 0,05 \text{ угл.с}$. Следует отметить, что приведенное значение соответствует погрешности однократного измерения, т.е. измерения, проведенного в течение одного оборота платформы с КЛ, время которого обычно составляет величину порядка 1,5 с. Дальнейшее уменьшение случайной погрешности в лазерном гониометре достигается накоплением и статистической обработкой больших массивов измерений, которые легко достигаются в динамическом режиме. Из сказанного следует, что случайная погрешность измерений при достаточно больших массивах измерений находится на уровне нескольких тысячных угловой секунды.

Систематическая погрешность лазерного гониометра [7] определяется в основном влиянием внешнего магнитного поля на КЛ (обычно это в первую очередь магнитное поле Земли). Экспериментальные исследования показали, что эта погрешность сосредоточена на первой гармонике частоты вращения и ее амплитуда для неэкранированного КЛ составляет 0,09 угл.с. При использовании сравнительно простых экранов (например, стальной корпус ротора ЛДГ, в котором размещен КЛ) амплитуда систематической составляющей погрешности уменьшается до 0,03...0,05 угл.с. Эта составляющая погрешности может быть учтена и скомпенсирована алгоритмически.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Proceedings of International seminar "Requirements and recent developments in high precision angle metrology", PTB, Braunschweig, Germany, 2003.
2. Probst R. et al., The new PTB angle comparator, Meas. Sci. Technol., 1998, v.9, pp. 1059-1066.
3. Masuda T., Kayitani M. High Accuracy Calibration System for Angular Encoders, J. Robot Mechatron. 1993, v.5, pp. 37-45.
4. Шестопапов Ю.Н. Государственный первичный эталон единицы плоского угла. Научно-технический семинар "Современные методы и средства воспроизведения и передачи размеров единиц длины и плоского угла". Тезисы докладов, ГУП ВНИИМ им. Д.И. Менделеева., Метрологическая академия. С.-Петербург, 2000.
5. Filatov Yu.V., Loukianov D.P., Probst R. Angle measurement by means of a ring laser goniometer, Metrilogia, 1997, v.34, p. 343.
6. Бурнашев М.Н., Лукьянов Д.П., Павлов П.А., Филатов Ю.В., Развитие методов и средств лазерной динамической гониометрии, Квантовая электроника, 2000, т.30, №2, 141-146.
7. Кривцов Е.П., Филатов Ю.В. Исследование погрешности воспроизведения единицы плоского угла кольцевого лазера, Измерительная техника, 1989, №12, с.11.

© Ю.В. Филатов, 2005

УДК 539.374:530.145:535.8

Л.Б. Зуев, В.В. Горбатенко, Б.С. Семухин

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ И АППАРАТУРА ДЛЯ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

Введение. Исследование особенностей пластического течения твердых тел при приложении механической нагрузки является одной из наиболее старых и трудных проблем экспериментальной механики. Многообразие используемых материалов и различие их механических свойств делает необычайно трудной проблему установления общих для всех деформируемых сред закономерностей пластического течения, что совершенно необходимо для создания сколько-нибудь общей физической теории пластичности. Традиционные пути исследования пластических свойств материалов имеют два предельных по масштабам объекта анализа варианта: макроскопический, состоящий в исследовании формы кривой пластического течения с одновременным наблюдением за крупными деталями формоизменения объекта и сопутствующими явлениями, и микроскопический, сосредоточенный на детальном анализе распределения дефектов в микрообъемах с помощью, например, электронной микроскопии тонких фольг. При сопоставлении данных, получаемых этими двумя методами, возникают определенные затруднения, требующие для своего разрешения использования не всегда оправданных предположений.

Исследования физики пластической деформации, проведенные в последние два десятилетия в ИФПМ СО РАН, показали, что пластическое течение является процессом, склонным к локализации, причем такую локализацию следует рассматривать как результат самоорганизации в системе дефектов кристаллического строения деформируемого материала [1, 2]. Основной массив экспериментальных данных был получен с помощью

различных вариантов спекл-интерферометрии [3, 4], которые позволяют измерять смещения до 100 мкм, что при характерном размере объекта ~100 мм соответствует приросту деформации $\Delta\varepsilon \approx 10^{-3}$. Это обстоятельство, а также сравнительно низкая чувствительность к вибрациям и качеству оптических схем и лазеров сделали спекл-интерферометрию весьма перспективным вариантом исследовательской методики в области физики и механики пластичности.

Несмотря на успехи спекл-фотографического метода в исследованиях пластического течения, ряд его очевидных недостатков, а также прогресс в развитии компьютеров и ПЗС-видеокамер подтолкнули нас к разработке альтернативного оптико-телевизионного метода визуализации локализованной деформации. При его создании, прежде всего, было необходимо обеспечить возможность регистрации процессов деформации и разрушения в реальном времени, а также повысить пространственное разрешение при исследовании неоднородности фронтов пластического течения и структуры его отдельных очагов.

Оптико-телевизионный метод. Поиск альтернативных путей отображения картин неоднородной деформации привел к двум вариантам использования эффекта декорреляции спекл-картин для наблюдения зон локализации деформации. Первый подход был реализован нами в работах [5-7], где неоднородное по образцу распределение деформации визуализировалось полем выборочного коэффициента взаимной декорреляции D видеосигнала S , вычисляемого в пределах $(m \times n)$ -пиксельных окрестностей отображаемых точек спекл-видеоизображений деформируемой поверхности и определяемого как

$$D_{ijk}^{(m \times n, p)} = 1 - \left| \left((S_{ijk} - \langle S_{ijk} \rangle) / \sigma_{S_{ijk}} \times (S_{ij(k-p)} - \langle S_{ij(k-p)} \rangle) / \sigma_{S_{ij(k-p)}} \right) \right|. \quad (1)$$

Здесь i, j – координаты в пиксельном представлении, k – номер видеокадра, $p \geq 1$ – межкадровый сдвиг (число кадров между сравниваемыми спекл-изображениями). Алгоритм (1) обеспечил визуализацию очагов локализованной пластической деформации (рис. 1) и восстановление положения их фронтов с погрешностью не хуже $1.5 \div 2$ пикселей при межкадровом приросте деформации растяжения $\Delta\varepsilon \geq 3 \cdot 10^{-5}$ и применении линейного регрессионного сглаживания координат фронтов. Однако область применения метода также оказалась ограниченной нелинейностью зависимости D от лежащих в плоскости наблюдения компонент деформации ε_{xx} и ε_{yy} и ее насыщением при $\Delta\varepsilon \square \geq 7,5 \cdot 10^{-4}$.

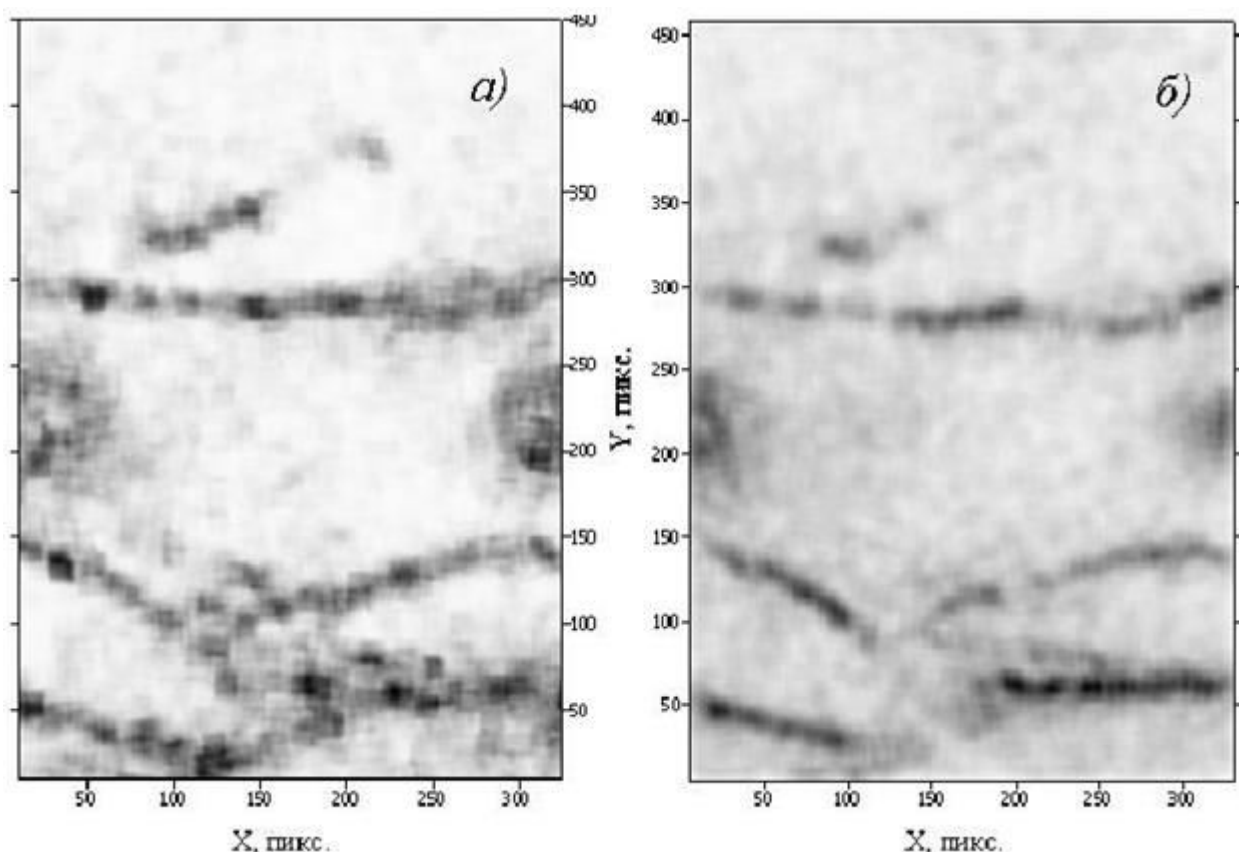


Рис. 1. Визуализация пластического течения при одноосном растяжении плоского образца малоуглеродистой стали 09Г2С с симметричными поперечными надрезами, выполненная с пространственно-ограниченным усреднением: а) методом вычислительной декорреляции; б) полем скорости мерцания видеоспеклов

Указанные недостатки непосредственного использования явления декорреляции спеклов для визуализации пластического течения удалось преодолеть [8] при усовершенствовании процедуры счета числа мерцаний спеклов M , описанной в [9]. В этом случае пластическое течение успешно визуализировалось в реальном времени полем скорости мерцаний спеклов, определяемой усреднением по ансамблю статистически-независимых одновременных измерений в $(m \times n)$ -пиксельной окрестности отображаемой точки:

$$\dot{\bar{M}}_{ij(k-p/2)}^{(m \times n, p)} = -\frac{1}{p} \cdot \bar{M}_{ij(k-p)}^{(m \times n)} + \frac{1}{p^2} \cdot \int_{k-p}^k dq \cdot \bar{M}_{ijq}^{(m \times n)} \quad (2)$$

При этом само мерцание в процессе каждого независимого измерения определяется как акт межкадрового (в интервале $[k-1, k]$) перехода видеосигнала S_{ijk} через соответствующий счетный порог $(1 + \beta) \cdot \bar{S}_{ijk}^{(m' \times n')}$, заданный относительным уровнем β видеосигнала S_{ijk} , усредненного по $(m' \times n')$ -пиксельной окрестности отображаемой точки. При переходах S_{ijk} через счетные β -пороги (как снизу вверх, так и сверху вниз) вычисляются текущие значения числа мерцаний по правилу: $M_{ijk}(\beta) = M_{ijk}(\beta) + 1$, а окрестность выбирается, исходя

из требования ее статистической представительности для определения среднего уровня S спекл-поля, приближающегося к среднему по генеральной выборке. Удалось установить, что при выборе окрестности можно ограничиться $2 \div 3$ средними размерами спекла, поскольку уменьшение их числа неоправданно увеличивает дисперсию величины $M(\beta)$, а увеличение ухудшает качество визуализации из-за неравномерной освещенности объекта. Усреднение $M(\beta)$ по ансамблю β проводится с учетом весовых коэффициентов, определенных на упругом участке растяжения в процессе получения калибровок $M(\beta) = M(\beta, \varepsilon_{xx})$.

Реализуемое алгоритмом (2) в результате интегрирования линейное регрессионное сглаживание текущих значений $\bar{M}_{ijk}^{(m \times n)}$ в интервале $[k-p, k]$ способствует подавлению шумов, обусловленных случайным характером распределения спекл-поля, если справедливо предположение о линейном по времени нарастании деформации. Аналогичный результат достигается усреднением межкадрового прироста числа мерцаний в $(m \times n)$ -пиксельной окрестности при условии, что компоненты ε_{xx} и ε_{yy} лежат в наблюдаемой плоской поверхности исследуемого объекта.

Положим, что обусловленная развитием пластической деформации декорреляция спеклов является случайным стационарным гауссовым процессом, имеет такое же распределение временной производной и описывает динамику мерцаний законом [9] $M \approx t/\tau$ (τ - временной интервал корреляции процесса). В этом случае с учетом независимо установленного вида зависимости $\bar{M}_{ijk}^{(m \times n)}(\varepsilon_{xx})$ межкадровым приращениям $\bar{M}_{ijk}^{(m \times n)} - \bar{M}_{ij(k-p)}^{(m \times n)}$ ставится в соответствие прирост деформации, что позволяет интерпретировать сигнал, определенный алгоритмом (2), как величину, линейно связанную с приростами компонент тензора деформации за межкадровое время.

При этом условии алгоритм (2) обеспечивает визуализацию деформации с единственным временным параметром - меткой времени $k - p/2$. При линейном нарастании деформации ширина интервала регрессионного сглаживания p не определяет явно значение визуализирующего сигнала (скорости мерцания спеклов) в отличие от алгоритма (1), сигнал которого D прямо связан с межкадровым сдвигом p . Следовательно, алгоритм (2) имеет однопараметрический характер, что при линейном характере зависимости прироста мерцаний от ε_{xx} и ε_{yy} существенно облегчает сбор данных о пространственно-временной структуре деформационного поля, упрощает их интерпретацию и допускает оценку накопления деформации интегрированием сигнала по времени.

В силу линейного характера зависимости $\bar{M}_{ijk}^{(m \times n)}(\varepsilon_{xx})$, алгоритм (2) выгодно отличается от спекл-декорреляционного алгоритма (1) точностью и информативностью отображения поля деформации. Алгоритм (2) имеет также преимущество по зашумленности, о чем свидетельствуют более низкие значения среднего квадратичного отклонения и его независимость от

деформации. Это обуславливает более высокие изобразительные возможности алгоритма (2) для визуализации пластического течения, как это можно видеть на рис. 1.

Приложение метода. Описанная методика и реализующий ее прибор ALMEC-TV (Automatic Laser Measuring Complex –TV) были применены к исследованию особенностей локализации деформации на стадии предразрушения пластичных материалов [10, 11], т.е., для оценки предельных состояний металлов и сплавов. Эксперименты выполнялись на сплавах на основе Mg, V и Fe-3 мас.% Si, а также на микрокристаллическом (размер зерна менее 1 мкм) чистом Al. На стадии предразрушения всех этих материалов между напряжением течения σ и деформацией ε существует параболическая связь типа $\sigma \sim \varepsilon^n$ с показателем параболичности $0 \leq n \leq 1/2$. Методика определения n детально описана в работах [2, 10]. Типичные результаты, полученные для исследованных сплавов, показаны на рис. 2 и 3. Оказывается, что на этом этапе процесса очаги локализованной деформации движутся согласованно. Смысл, вкладываемый в этот термин, ясен из рис. 2, на котором приведены данные о кинетике движения очагов локализованной деформации в образцах из микрокристаллического алюминия. Видно, что очаги на заключительной стадии процесса движутся таким образом, что графики их перемещения на диаграммах в координатах «положение очага X – время t » прямолинейны и образуют пучок, сходясь к центру с координатами X^* и t^* .

Скорости очагов локализованной деформации на этапе предразрушения различны для каждого из очагов, но сохраняют постоянство в период их существования. Экстраполируя участки зависимостей $X(t)$, для которых $n < 1/2$, до пересечения, можно показать, что прямые $X(t)$ и во всех случаях образуют пучки, и найти координаты их центров X^* и t^* . В некоторых случаях для определения X^* и t^* требуется экстраполяция зависимости $X(t)$ к большим временам, как это можно видеть на рис. 2 и 3. Ясно, что уже с начала этого этапа скорости движения очагов локализованной деформации автоматически синхронизируются таким образом, чтобы обеспечивался их одновременный «приход» в центр, пространственное положение X^* и время достижения t^* которого близки к месту и моменту разрушения образца. На рис. 2 это отмечено значком «*».

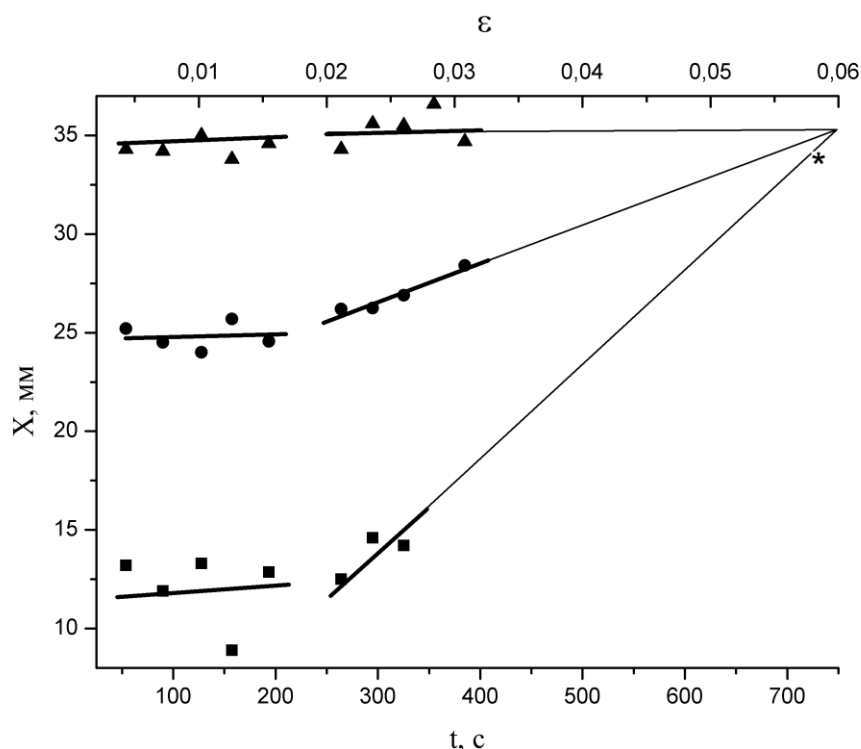


Рис. 2. Кинетика очагов локализованной пластичности в Al

Во всех случаях скорость каждого из очагов на стадии предразрушения остается неизменной, и ее величина зависит только от места зарождения очага: чем ближе это место к зоне будущего разрушения, тем меньше скорость. Заметим также, что на самом деле очаги локализованной деформации, подвижные на этой стадии процесса, в определенный момент прекращают свое развитие (исчезают). Из их числа «выживает» один, положение которого при рождении соответствует месту образования макроскопической шейки и будущего вязкого разрушения. Согласованно движущиеся на стадии предразрушения очаги локализованной пластичности могут стартовать как с одной стороны от стационарной зоны (рис. 2), так по обе стороны от нее (рис. 3).

Возможность достаточно раннего предсказания места и времени вязкого разрушения может быть основой методики прогноза этого явления, например, при различных вариантах обработки металлов давлением. В идеале для его реализации необходимо иметь только начальную информацию о кинетике движения хотя бы двух очагов локализованного пластического течения.

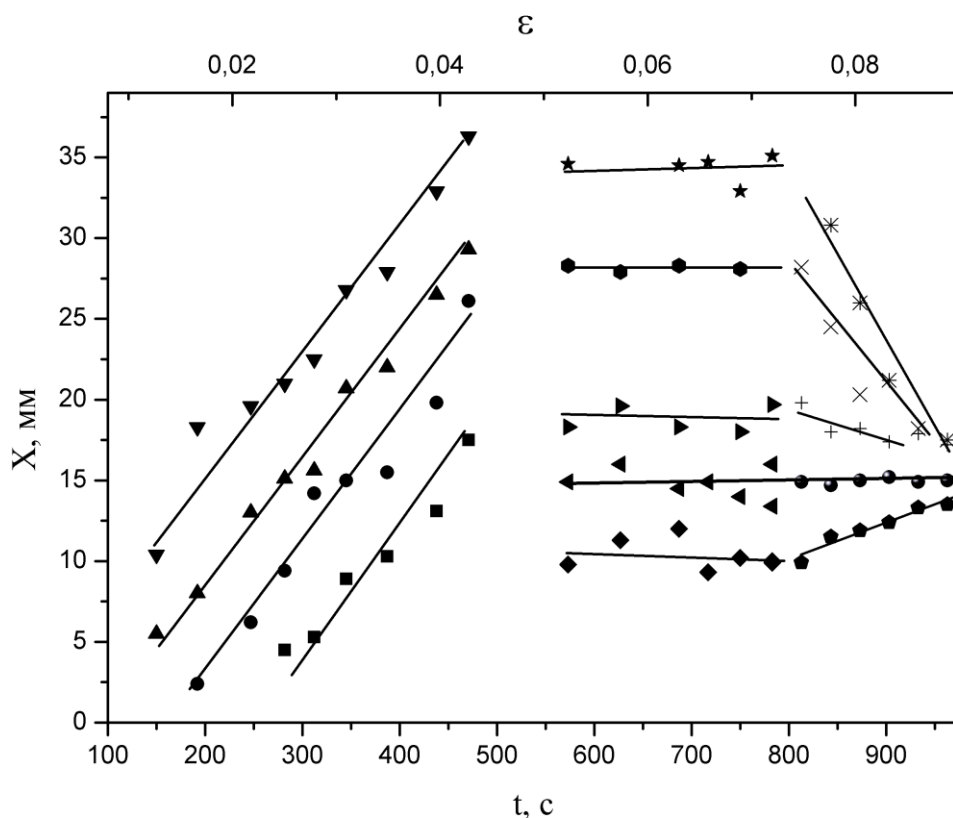


Рис. 3. Кинетика очагов локализованной пластичности в сплаве V (2,3 мас.% Zr; 0,4 мас.% C)

Акустические методы контроля прочности. Для развития ускоренных методов контроля показателей прочности была разработана методика, основанная на установленной ранее связи между скоростью звука и свойствами металлов и сплавов [12]. Разработанные для этих целей прибор ASTR (Acoustic Stress Tester Rapid; точность измерения скорости ультразвука $\sim 10^{-4}$) и его последующие модификации, функционирующие на основе метода автоциркуляции звуковых импульсов [13], предназначены для контроля качества металла, определения его прочности без механических испытаний образцов, оценки уровня остаточных напряжений в металлических конструкциях и деталях машин, определения усталостных повреждений и предсказания усталостного разрушения.

Метод основан на существовании линейной связи между скоростью распространения ультразвука V_s и напряжением течения σ , установленной в [14]

$$V_s = V_0 + \xi \sigma, \quad (3)$$

где эмпирические константы V_0 и ξ зависят от свойств материалов.

Универсальность линейной связи скорости ультразвука и уровня приложенных напряжений, описываемая соотношением (3), была доказана непосредственной проверкой на ряде металлов и сплавов с разной структурой [14]. В таком случае после перехода к безразмерным переменным V_s/V_s^* и

σ/σ_B ($V_S^* \neq V_0$ - скорость звука в недеформированном материале, σ_B - временное сопротивление) уравнению (3) удается придать вид

$$V_S/V_S^* = \kappa + \alpha \cdot \sigma/\sigma_B, \quad (4)$$

где безразмерные константы κ и α практически не зависят от сорта материала и могут быть определены экспериментально [14]. Из (4) следует уравнение

$$\sigma_{B\text{расч}} = \alpha \sigma / \left[\left(V_S/V_S^* \right) - \kappa \right], \quad (5)$$

для расчета величины временного сопротивления. Как видно из рис. 4, рассчитанное по (5) значение $\sigma_{B\text{расч}}$ линейно коррелирует (коэффициент корреляции $\sim 0,94$ является весьма значимым [15]) со значением $\sigma_{B\text{эксп}}$, полученным при механических испытаниях образцов, так что $\sigma_{B\text{расч}} = 1,04 \sigma_{B\text{эксп}}$.

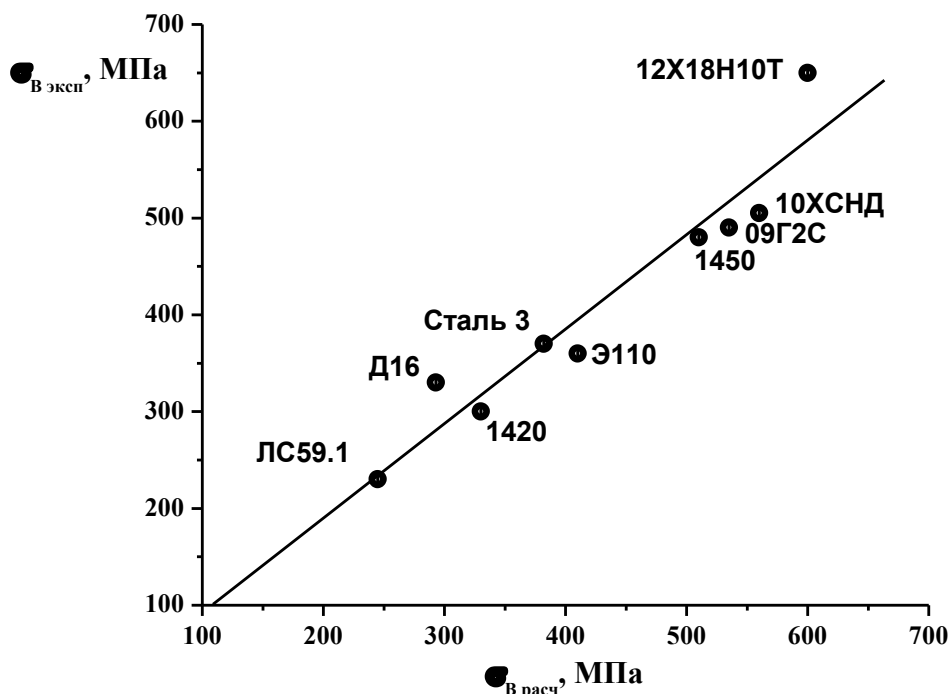


Рис. 4. Корреляция между значениями временного сопротивления, определенными акустическим методом ($\sigma_{B\text{расч}}$) и механическими испытаниями ($\sigma_{B\text{эксп}}$)

Это означает, что ультразвуковые измерения могут рассматриваться как альтернатива традиционным методам определения временного сопротивления металлов и сплавов, требующим изготовления специальных образцов.

Связь скорости распространения ультразвука и остаточных напряжений была использована для разработки метода оценки напряженного состояния локомотивных тележек при ремонтах подвижного состава железнодорожного транспорта. При решении этой задачи одной из сложностей, которую пришлось преодолевать, было разное содержание легирующих примесей (главным

образом, Mn и Si) в применяемых для изготовления тележек сталях 20, М16С, 17Г2СФ и Ст.3 при практически эквивалентных значениях механических характеристик. В специальном исследовании было показано, что скорость ультразвука в этом случае зависит как от уровня остаточных напряжений, так и от концентрационного фактора, в качестве которого удобно использовать разность концентраций легирующих элементов Mn и Si, т. е., $\Delta C_{Mn-Si} = C_{Mn} - C_{Si} \%$. Зависимость скорости ультразвука от концентрационного фактора связана с тем, что атомы элементов замещения Mn и Si создают в решетке твердого раствора на основе α -Fe микроискажения разного знака [16], по-разному влияющие на величину скорости [12]. В результате для оценки уровня остаточных (растягивающих, т. е., $\sigma < 0$) напряжений предложено эмпирическое соотношение

$$\sigma = -71 - (1,2 + 10\Delta C_{Mn-Si})\Delta\nu \text{ МПа.} \quad (6)$$

Здесь $\Delta\nu$ - измеряемое прибором ASTR изменение частоты автоциркуляции, линейно связанное с изменением скорости распространения ультразвука.

Проведенные исследования позволили разработать методику контроля и установить критерий надежности по уровню остаточных напряжений в таких сложных изделиях как тележки локомотивов (рис. 5).

Для примера были проведены измерения на тележках тепловозов ЧМЭ-3 в локомотивном депо станции Новокузнецк ЗСЖД. Измерения показали, что в 5 тележках напряжения, определенные в точках, указанных на рис.5, не превышают 120 МПа. В одной из тележек при измерении в точке 1 напряжения превысили этот уровень более чем в три раза. В этом месте исследование с помощью стандартных средств дефектоскопии показало наличие трещины вблизи места сварки. Таким образом, была экспериментально подтверждена применимость и достоверность процедуры ультразвукового поиска опасных мест с помощью прибора ASTR и методики, предложенной ИФПМ СО РАН для ОАО «Российские железные дороги».

В процессе подготовки методики выполнения измерений был обоснован и введен критерий отбраковки тележек, схематически представленный на рис. 6 как сечение поверхности $\sigma(\Delta\nu, \Delta C_{Mn-Si})$ плоскостью критического уровня $\tilde{\sigma} = 200$ МПа. Значения, отвечающие области надежной эксплуатации, располагаются ниже критического уровня, а область опасных напряжений - выше.

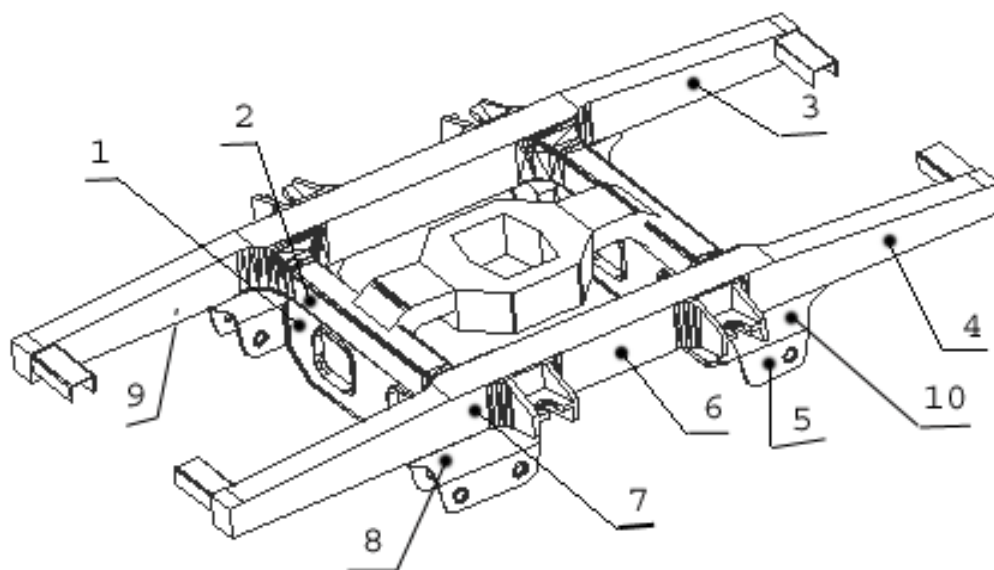


Рис. 5. Схема расположения мест измерения остаточных напряжений в тележке тепловоза ЧМЭ-3

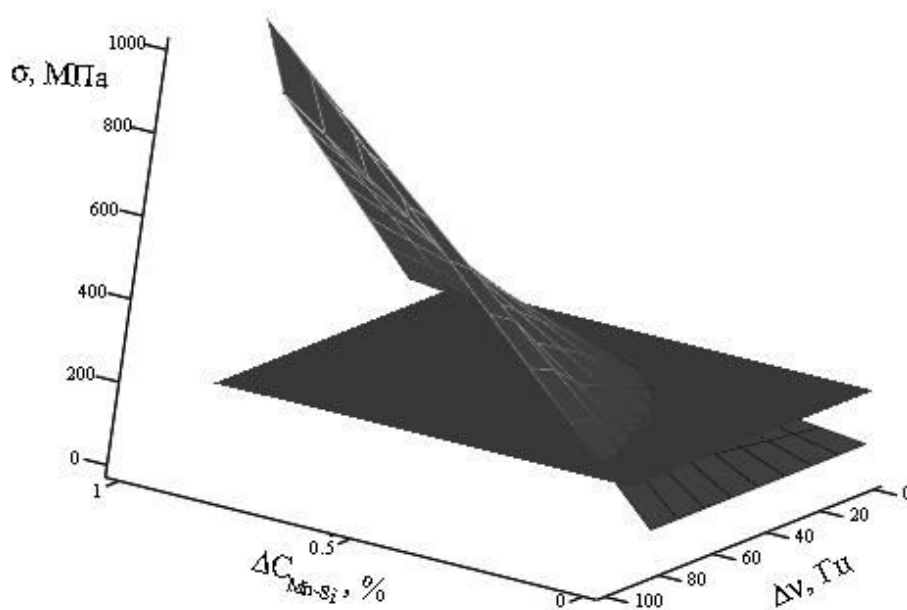


Рис. 6. К обоснованию критерия уровня остаточных напряжений в рамах тележек локомотивов с учетом различия в концентрации Mn и Si в сталях

Успешная разработка критерия позволила в течение 2003-2004 годов оснастить прибором ASTR более 50 локомотивных депо России и перейти к

применению методики ультразвуковой оценки уровня остаточных напряжений в тележках всех типов локомотивов, эксплуатирующихся в системе ОАО «РЖД».

Выводы

1. Развита основы оптико-телевизионной методики наблюдения очагов локализованной пластической деформации и разрушения в реальном времени.
2. Применение этой методики к анализу вязкого разрушения оказалось перспективным для создания неразрушающего метода прогнозирования разрушения при больших пластических деформациях.
3. Разработаны приборы и методики ультразвукового контроля уровня остаточных напряжений в деталях машин и механизмов.
4. Разработанные методики применены для измерения остаточных напряжений в деталях подвижного состава железнодорожного транспорта.
5. Более 50 локомотивных депо ОАО «Российские железные дороги» оснащены ультразвуковыми приборами для контроля тележек локомотивов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zuev L.B. // Annalen Phys. (Leipzig). 2001. V. 10, N 11-12. P. 965-984.
2. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Семухин Б.С. // Успехи физ. мет. 2002. Т. 3, № 3. С. 237-304.
3. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. М.: Мир, 1986. 327 с.
4. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Мних Н.М. // Завод. лаб. 1990. Т. 56, № 2. С. 90-93.
5. Горбатенко В.В., Поляков С.Н., Зуев Л.Б. // Завод. лаб. 2001. Т. 67, № 7. С. 29-32.
6. Zuev L.B., Polyakov S.N., Gorbatenko V.V. // Proc. SPIE. 2002. Vol. 4900, part 2. p. 1197-1206.
7. Горбатенко В.В., Поляков С.Н., Зуев Л.Б. // ПТЭ. 2002. № 3. С. 164-165.
8. Поляков С.Н., Горбатенко В.В., Лопаев Е.Л., Зуев Л.Б. // Автометрия. 2003. Т. 39, № 5. С. 102-111.
9. Владимиров А.П., Лисин А.Л., Микушин В.И., Кохан М.М., Куклин И.А., Кононенко Е.В. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25, № 24. С. 88-94.
10. Данилов В.И., Шляхова Г.В., Зуев Л.Б., Кунафина М.А., Рузанова Ю.В. // ФММ. 2004. Т. 98, № 3. С. 107-112.
11. Баранникова С.А., Данилов В.И., Зуев Л.Б. // ЖТФ. 2004. Т. 74, № 10. С. 52-56.
12. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука, 1996. 183 с.
13. Трузелл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972. 307 с.
14. Зуев Л.Б., Семухин Б.С., Лунев А.Г. // ПМТФ. 2002. Т. 43, № 1. С. 202-204.
15. Митропольский А.Г. Техника статистических вычислений. М.: ГИФМЛ, 1961. 479 с.
16. Меськин В.С. Основы легирования стали. М.: Металлургия, 1964. 684 с.

© Л.Б. Зуев, В.В. Горбатенко, Б.С. Семухин, 2005

ДВУХСПЕКТРАЛЬНЫЙ ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫЙ ОБЪЕКТИВ С ПЕРЕМЕННЫМ ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ

Плавно изменять технические характеристики наблюдательных приборов позволяют панкратические системы с переменным увеличением. Панкратические объективы имеют большие преимущества перед объективами с фиксированным размером изображения для любых применений, где имеют место взаимоисключающие друг друга требования разумно широкого поля зрения и высокого разрешения. Для тепловой ИК оптики дифракция ограничивает максимальное разрешение, поэтому возрастают требования к объективам с переменным фокусным расстоянием. Тем не менее, совсем недавно, из-за своей избыточной длины такие объективы редко использовались.

Задачи обнаружения и опознавания в оптико-электронных приборах в настоящее время решаются изменением фокусного расстояния, которое может быть выполнено либо заменой объектива, либо перемещением его компонентов. Объектив конструируется так, чтобы в нем сочетались минимально широкое поле зрения с максимальным угловым разрешением, при этом размер его меньше, чем у большинства обычных объективов с фиксированным увеличением. Наряду с компактностью достигнуты умеренные допуски на изготовление оптических деталей [1].

Задача может быть решена при использовании ниже приведенной конструкции двухспектрального зеркально-линзового объектива с переменным фокусным расстоянием (рис. 1), выполненной из фтористого кальция, который обладает достаточно высокими физико-химическими свойствами и прозрачен в заданном диапазоне спектра (от 0,486–до 5мкм).

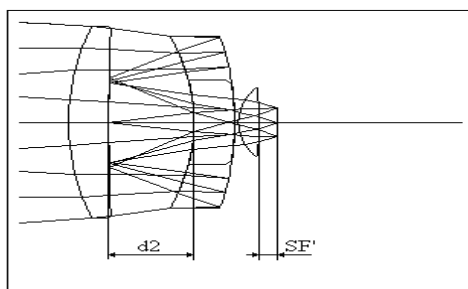


Рис. 1. Оптическая схема объектива

В табл. 1 показано, как с изменением положения компонентов происходит изменение оптических характеристик системы.

Положение компонентов, фокальной плоскости и фокусное расстояние
объектива

Положение	d_2 , мм	S_F , мм	f , мм
I	33.52	7.17	100.04
II	26.52	16.05	85.40
III	19.52	22.65	74.22

На рис. 2 представлено распределение энергии в абберационном пятне для видимого диапазона спектра (от 0,486–до 0,76 мкм) и трех положений.



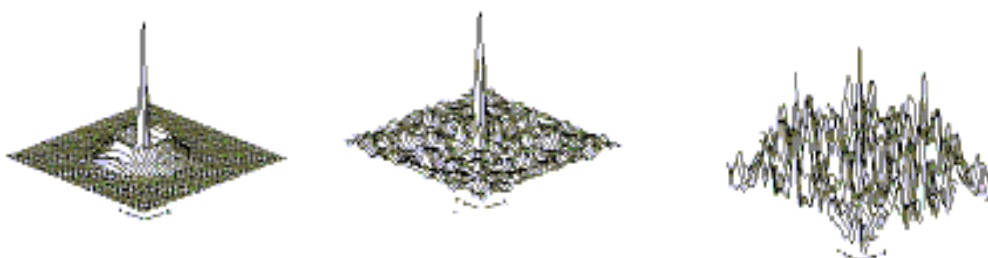
Положение первое

Положение второе

Положение третье

Рис. 2. Видимый диапазон спектра

На рис. 3 представлено распределение энергии в абберационном пятне для тепловизионного диапазона спектра (от 3–до 5мкм).



Положение первое

Положение второе

Положение третье

Рис. 3. Тепловизионный диапазон спектра

Из выше представленных результатов видно, что система во втором и в третьем положениях несколько уступает по качеству первому положению, как для видимого диапазона спектра, так и для тепловизионного. В целом поставленная задача достигнута, хотя требует некоторой дополнительной оптимизации.

На основе формулы хроматической суммы [2] конкретно для этого объектива проведен расчет хроматизма положения. Задача состоит в том, чтобы найти такие оптические силы, при которых это явление будет использовано наиболее оптимально, причем нужно компенсировать хроматизм для нескольких фокусных расстояний. Для компенсации хроматизма положения, используем уравнение для первой хроматической суммы S_{xpI} (1).

$$S_{xpI} = \sum_{i=1}^4 h_i C_i = 0, \quad (1)$$

где C - хроматический параметр;

h – высота.

Выражение (1) можно представить в виде

$$S_{ijk}=h_{ijk}C_{ijk}+h_{ijk}C_{ijk}+h_{ijk}C_{ijk}+h_{ijk}C_{ijk}=0,$$

где i – определяет положение ;

j – номер компоненты;

k – диапазон спектра.

$$S_{III}=h_{111}C_{111}+h_{112}C_{112}+h_{113}C_{113}+h_{114}C_{114}=0 \quad (2)$$

$$S_{II2}=h_{121}C_{121}+h_{122}C_{122}+h_{123}C_{123}+h_{124}C_{124}=0 \quad (3)$$

$$S_{II21}=h_{211}C_{211}+h_{212}C_{212}+h_{213}C_{213}+h_{214}C_{214}=0 \quad (4)$$

$$S_{II22}=h_{221}C_{221}+h_{222}C_{222}+h_{223}C_{223}+h_{224}C_{224}=0 \quad (5)$$

$$S_{III31}=h_{311}C_{311}+h_{312}C_{312}+h_{313}C_{313}+h_{314}C_{314}=0 \quad (6)$$

$$S_{III32}=h_{321}C_{321}+h_{322}C_{322}+h_{323}C_{323}+h_{324}C_{324}=0 \quad (7)$$

Так как $\alpha_1=0$, то $h_{111}C_{111}=0$

$C_3=0$ (то есть зеркало не имеет хроматизма), тогда $h_{113}C_{113}=0$

Введем ряд ограничений:

$$C = \frac{\alpha}{\mu} \sigma \frac{\Delta n}{n} ; \mu = \frac{1}{n} ; \alpha = \alpha_3 - \alpha_2, \quad (8)$$

отсюда получим

$$C_{112} = (\alpha_3 - \alpha_2) \frac{\Delta n}{\mu n} \sigma ; \alpha_3 = \alpha_2 + h_{112}\varphi_2 ; \alpha_3 - \alpha_2 = h_{112}\varphi_2 \quad (9)$$

$$C_{114} = (\alpha_4 - \alpha_2) \frac{\Delta n}{\mu n} \sigma ; \alpha_5 = \alpha_4 + h_{114}\varphi_4 ; \alpha_5 - \alpha_4 = h_{114}\varphi_4 \quad (10)$$

$$\sigma \left(-\frac{\Delta n}{\mu n} \right) S_{III} = h_{112}(\alpha_3 - \alpha_2) + h_{114}(\alpha_5 - \alpha_4); \quad (11)$$

$$\sigma \left(-\frac{\Delta n}{\mu n} \right) S_{III} = h_{112}\varphi_{112}h_{112} + h_{114}\varphi_{114}h_{114} \quad (12)$$

$$\sigma \left(-\frac{\Delta n}{\mu n} \right) = const \quad (13)$$

Приравняем к нулю правую часть уравнения:

$$(h_{112})^2 \varphi_{112} + (h_{114})^2 \varphi_{114} = 0 ; \quad (14)$$

отсюда

$$(h_{112})^2 \varphi_{112} = -(h_{114})^2 \varphi_{114}; \quad (15)$$

$$\frac{\varphi_{112}}{\varphi_{114}} = -\frac{(h_{114})^2}{(h_{112})^2}; \quad (16)$$

Остальные уравнения решаются аналогично:

$$\frac{\varphi_{122}}{\varphi_{124}} = -\frac{(h_{124})^2}{(h_{122})^2}; \quad (17)$$

$$\frac{\varphi_{212}}{\varphi_{214}} = -\frac{(h_{214})^2}{(h_{212})^2}; \quad (18)$$

$$\frac{\varphi_{222}}{\varphi_{224}} = -\frac{(h_{224})^2}{(h_{222})^2}; \quad (19)$$

$$\frac{\varphi_{312}}{\varphi_{314}} = -\frac{(h_{314})^2}{(h_{312})^2}; \quad (20)$$

$$\frac{\varphi_{322}}{\varphi_{324}} = -\frac{(h_{324})^2}{(h_{322})^2}. \quad (21)$$

Таким образом, требовалось обеспечить коррекцию хроматизма в двух спектральных диапазонах и сохранить ее результаты для разных положений компонентов. Используя формулу (1) и ряд ограничений, получим систему уравнений для трех положений в двух диапазонах спектра, анализ которых показывает зависимость отношений оптических сил.

В отличие от системы с постоянным фокусным расстоянием в данном случае компоненты положения будут разные, поэтому для дальнейшего анализа оптических сил необходимо будет использовать уравнение [3].

$$\varphi_2 = 2\varphi_4 + \frac{n_1}{n_2} \varphi_{\text{зерк.}} \quad (22)$$

$n_1=1$ (воздух),

$$\varphi_4 = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n-1)^2 d}{nr_1 r_2}; [11] \quad (23)$$

$$\frac{r_1 - r_2}{d} = 1 - \frac{1}{n^2}; [4] \quad (24)$$

Выражаем отсюда n :

$$n = \sqrt{\frac{d}{r_2 - r_1 + d}}; \quad (25)$$

$$\varphi_{\text{зерк.}} = \frac{1}{2r_2}; \quad (26)$$

Подставив в выражение (22) формулы (23,25,26), получаем:

$$\varphi_2 = 2 \left[\left(\sqrt{\frac{d}{r_2 - r_1 + d}} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{\left(\sqrt{\frac{d}{r_2 - r_1 + d}} - 1 \right)^2 d}{\sqrt{\frac{d}{r_2 - r_1 + d}} r_1 r_2} \right] + \frac{1}{\sqrt{\frac{d}{r_2 - r_1 + d}}} \frac{1}{2r_2}; \quad (27)$$

Проведя ряд преобразований, получаем:

$$\varphi_2 = 2 \left[\left(\sqrt{\frac{d}{r_2 - r_1 + d}} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \sqrt{\frac{d^3}{r_2 - r_1 + d}} \frac{1}{r_1 r_2} - \frac{2d}{r_1 r_2} + \sqrt{d(r_2 - r_1 + d)} \right] + \sqrt{\frac{(r_2 - r_1 + d)}{d}} \frac{1}{2r_2} \quad (28)$$

На основании выше изложенного видно, что отношения оптических сил зависят от отношения высот второго и четвертого компонентов и не зависят от длины волны. Поскольку высоты в разных спектральных диапазонах для одного положения будут одни и те же, то оптическая сила зеркала будет постоянна. Для расчета принимаем оптическую силу второго и четвертого компонентов соответствующую среднему значению диапазона изменения фокусных расстояний.

Данная статья посвящена разработке двухспектрального зеркально-линзового объектива с переменным фокусным расстоянием. Задача заключалась в теоретическом обосновании возможности разработки двухспектрального зеркально-линзового объектива с переменным фокусным расстоянием. Результаты проведенных расчетов теоретически показали целесообразность данной работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оптико-механические и оптико-электронные приборы: Межвуз. сб.- Новосибирск: НИИГАиК, 1985.-163 с.
2. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. / Г.Г. Слюсарев. – Л.: Машиностроение, 1975. – 250 с.
3. Гаврилов Д.В. Расчет простой линзы с одной отражающей поверхностью/ Оптика и спектроскопия. – 1962. – Т.- 13 - С. 436 – 431
4. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем / 2-е изд., доп. и перераб.: М: Машиностроение, 1969.- 372с.
5. Jamieson T. H. Ultrawide waveband optics/ Optical Engineering.-1984.-V.23, №2.-p 111.

© Ю.Г. Рахманова, 2005

ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Интерес к созданию телевизионных (ТВ) камер, работающих в УФ области спектра, обусловлен широким использованием данных приборов в различных областях науки и техники, например, в экологическом мониторинге Земли для дистанционной индикации разливов нефтепродуктов на воде и суше [1]. Кроме того, применение высокочувствительных телевизионных камер, работающих в УФ области спектра, в качестве дополнительного информационного канала в составе многоспектральных оптико-электронных систем (ОЭС), может значительно повысить их информативность.

В УФ диапазоне в целом ряде случаев наблюдается более высокий контраст объектов искусственного происхождения на природном фоне [1]. На рис. 1, 2 приведены изображения человека в маскировочном костюме на фоне снега в видимом и УФ диапазонах соответственно. Изображения получены с помощью низкоуровневых ТВ камер с телевизионным разрешением 400 ТВЛ. На графиках, размещённых под изображениями, показан соответствующий (инвертированный) уровень сигнала.

На рис. 1 человек в маскировочном костюме практически теряется на фоне белого снега. Уровень и характер сигнала на пикселах соответствующих его изображению практически не отличается от характеристик фона. Единственными демаскирующими элементами являются незащищённое камуфляжем лицо и отбрасываемая им тень.

На изображении, полученном в УФ диапазоне на длине волны около 360 нм (рис. 2), маскировочный костюм и лицо человека выглядят значительно темнее окружающих его объектов. Высокий контраст позволяет легко обнаружить и уверенно и распознать замаскированный таким образом объект.

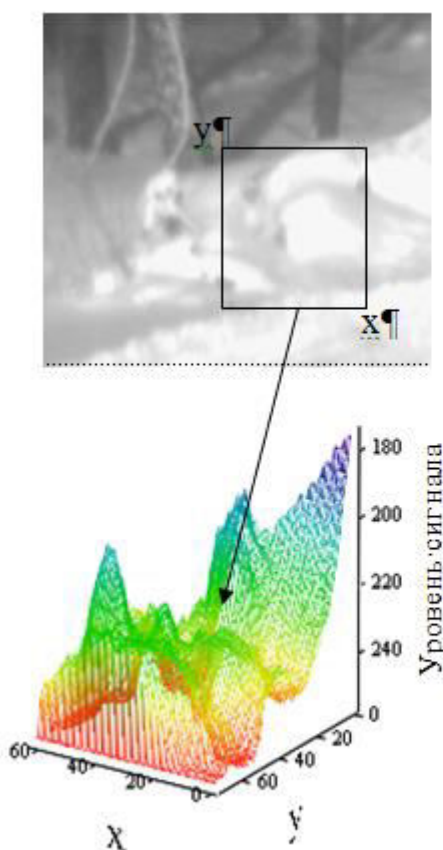


Рис.1

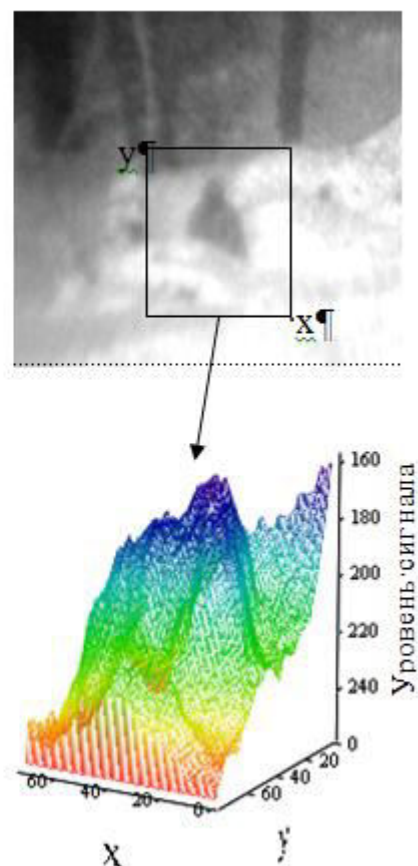


Рис. 2

Работы по созданию ТВ камер чувствительных в УФ области проводятся достаточно давно. Первоначально это были приборы с одноэлементным приёмником (ФЭУ или фотодиод) и электромеханическим сканирующим устройством. Однако, настоящее развитие в этой области началось после появления матриц ПЗС, работающих в широком спектральном диапазоне (от ближнего УФ до ближнего ИК), со сдвинутым в область от 250 до 400 нм максимумом спектральной чувствительности.

Дискретизация кадра у современных ПЗС такого типа весьма высокая (1024×1024 элементов и выше). Например, фирмой HAMAMATSU была разработана ПЗС-камера С4880-50 с числом элементов 1024×1024, размером пиксела 13 мкм и диапазоном спектральной чувствительности от 200 до 1000 нм [2]. В России научно-производственным предприятием «ЭЛЕКТРОН-ОПТРОНИК» было создано семейство ПЗС камер S1С, предназначенных для работы в УФ и видимом диапазонах спектра [3]. Камеры имеют размеры фоточувствительного элемента от 14×14 до 22×22 мкм, диапазон спектральной чувствительности от 220 до 1000 нм.

На следующем этапе развития были разработаны солнечнослепые ПЗС - камеры, например, фирмой SONY была создана матрица ПЗС XC-EU50 форматом 1/2", с числом эффективных пикселей 768×494, с диапазоном спектральной чувствительности 300-400 нм. Созданная на её базе ТВ камера имеет пространственное разрешение 570 ТВЛ [4].

Общим недостатком камер, приёмником излучения в которых служит матрица ПЗС, является недостаточно высокий уровень пороговой освещенности, не превышающий 10^{-3} Вт/м². Поэтому, современные высокочувствительные ТВ камеры создаются на основе ЭОП. Примером может служить, УФ ТВ камера, созданная в ЦНИИ «Электрон», г. Санкт-Петербург, на основе высокочувствительного гибридного прибора [1].

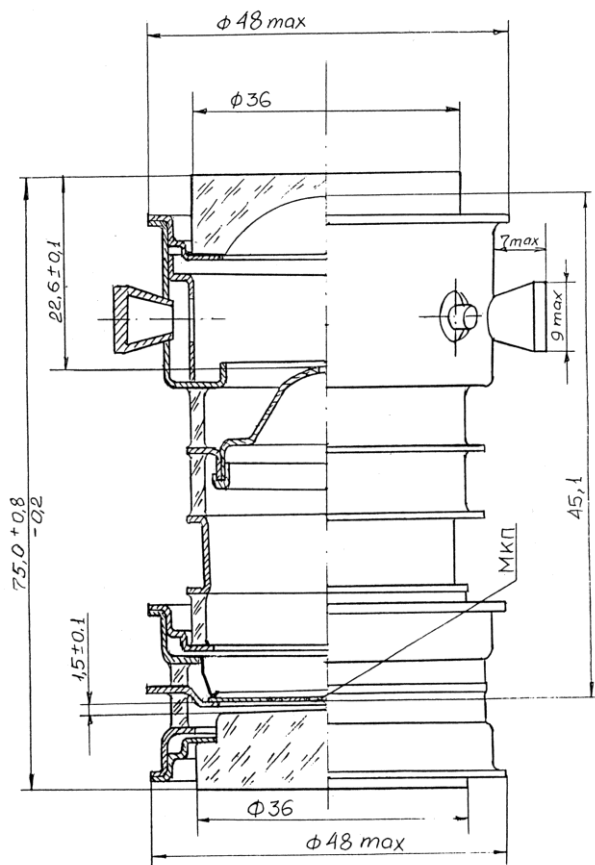


Рис. 3

Гибридный прибор представляет собой ЭОП второго поколения непосредственно сочленённый с ПЗС. Типичная конструкция гибридного блока усилителя яркости такой телевизионной камеры показана на рис. 3.

Фотокатод CsTe нанесен на входное окно сферической формы. Выбитые с поверхности фотокатода попадающими на неё квантами света электроны фокусируются системой электродов на входной плоскости МПК. В непосредственной близости от заднего среза МПК установлен экран с люминофором. Сферическая форма фотокатода и наличие

корректирующих электродов приводят к снижению разрешения на краях поля зрения с 400 до 250 ТВЛ. Сочленение ЭОП с чувствительной подложкой матрицы ПЗС осуществляется с помощью оптоволоконного диска (или фокона). При такой схеме сочленения уменьшаются габариты системы, а также повышается коэффициент передачи световой энергии с экрана ЭОП на ФППЗ. В то же время, такая схема имеет ряд недостатков [5]:

- Периодичность структуры фокона приводит к эффекту муара, который возникает, если период дискретной структуры фокона пропорционален дискретной структуре ПЗС;
- Ограниченный коэффициент передачи контраста, который зависит от распределения излучения, падающего на торцы световедущих жил и световедущих прослоек;
- При выходе из строя ЭОП или матрицы ПЗС прибор не подлежит восстановлению.

Основные характеристики камеры [1]:

Спектральная чувствительность с дополнительным фильтром, нм 260-380

Пространственное разрешение в центре, ТВЛ 400

Угол поля зрения, град	4
Фокусное расстояние, мм	200
Предел чувствительности, Вт/эл	10^{-16}
Вес, кг	2,8
Напряжение питания, В	27

В настоящее время в КТИ ПМ СО РАН создана высокочувствительная ТВ камера (УФ ТВМ) на основе сочленённого при помощи проекционного объектива с матрицей ПЗС солнечнослепого ЭОП, предназначенная для наблюдения в УФ области спектра.

Модульный принцип построения УФ ТВМ позволяет производить замену вышедших из строя элементов камеры (ЭОП, проекционный объектив, матрица ПЗС), а также модернизировать УФ ТВМ по мере разработки любого из основных компонентов с улучшенными характеристиками. Применение оптики переноса на основе проекционных объективов, конечно, влечет за собой незначительное увеличение габаритов, однако позволяет исключить практически все перечисленные недостатки предыдущего способа сочленения.

Основные характеристики камеры:

Спектральная чувствительность с дополнительным фильтром, нм	230-380
Пространственное разрешение, по всему полю зрения, ТВЛ	400
Угол поля обзора, град	2,5
Фокусное расстояние, мм	411
Пороговая облученность, в плоскости фотокатода, Вт/см ²	10^{-11}
Напряжение питания, В	27

Блок усиления яркости выполнен на основе специально разработанного солнечно-слепого ЭОП 3-го поколения «Солидус-ФЭП». Квантовая эффективность ЭОП «Солидус-ФЭП» показана на рис. 4.

Данный ЭОП имеет плоский фотокатод, что не приводит к уменьшению разрешения на краях поля зрения, а, следовательно, и ухудшению качества изображения.

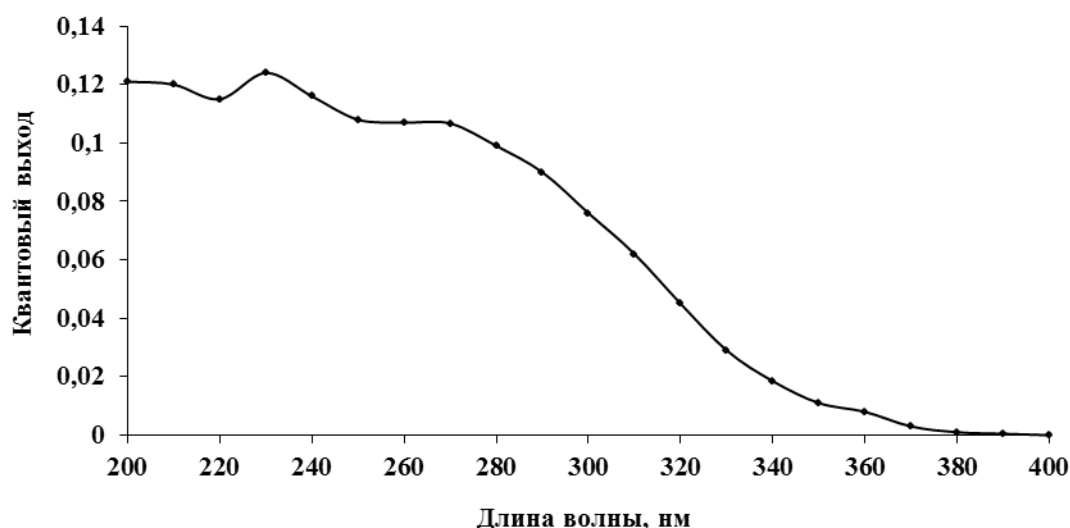


Рис. 4

В качестве блока формирования видеосигнала в УФ ТВМ используется телевизионная ПЗС-камера форматом 1/2" с размером элемента 9×9 мкм. Телевизионное разрешение ПЗС-камеры 600 ТВЛ. Частота кадра 25 Гц.

Результатом проведения ряда научно-исследовательских и опытно-

конструкторских работ в КТИ ПМ СО РАН явилась разработка базового унифицированного ТВ модуля для УФ области. Его конструкция представлена на рис. 5.

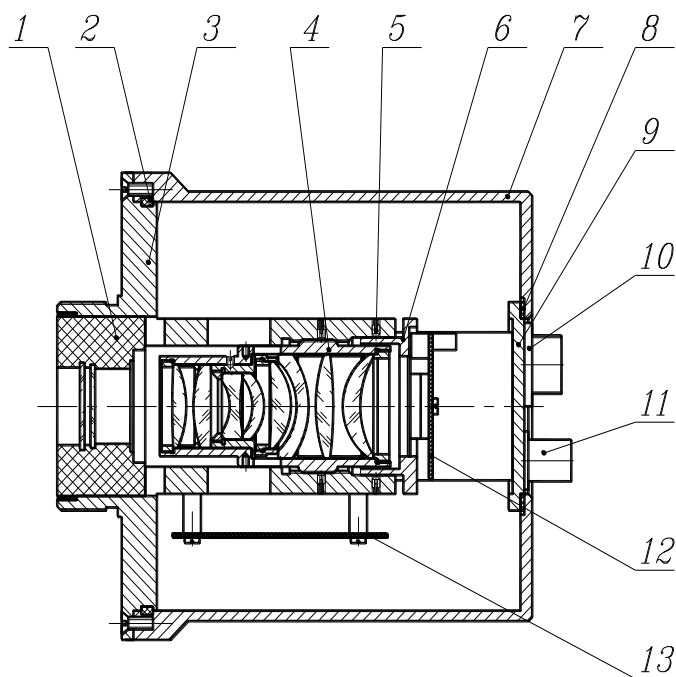


Рис. 5

Солнечнослепой ЭОП 1 вклеен в корпус 3. Непосредственно за экраном ЭОП размещена система переноса изображения 4. Корпус системы переноса изображения ввёрнут по резьбе в корпус 3. Совмещение фокальной плоскости системы переноса изображения 4 с плоскостью люминофора ЭОП 1 производится вращением системы переноса изображения. Её положение фиксируется

стопорными винтами. ПЗС камера 12 крепится на стойках к втулке 6. Втулка 6 вставлена в гладкое отверстие на корпусе 3, так, чтобы плоскость фоточувствительных элементов ПЗС матрицы совпадала с задней фокальной плоскостью системы переноса изображения. Втулка 6 фиксируется стопорными винтами. К заднему торцу корпуса 3 привёрнута панель 9 с размещёнными на ней разъёмами РСГС 7 и СР-50, поз. 10, 11 соответственно. К боковым стенкам

корпуса 3 крепятся плата 13 питания ЭОП и остальные платы ПЗС камеры. Модуль имеет стандартный видеовыход и автоматическую коррекцию по уровню сигнала.

В дальнейшем в КТИ ПМ СО РАН планируется продолжение работ по совершенствованию УФ модулей – повышению их пространственного разрешения и чувствительности. Пути реализации данной задачи возможны следующие:

- Увеличение пространственной разрешающей способности ЭОП с одновременным увеличением интегральной чувствительности фотокатода;
- Использование в УФ модулях матриц ПЗС с большим количеством светочувствительных элементов, меньшего размера;
- Выдача информации в цифровом виде с дальнейшей математической обработкой сигнала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов В.Н., Суриков И.Н., Шилин Б.В. Дистанционные наблюдения в ультрафиолетовом диапазоне // Оптический журнал – 2003 - т. 70 - №5 – С.56-59.
2. Internet: <http://www.hamamatsu.com>
3. Internet: http://www.silar.spb.ru/c/sl_c_r.htm
4. Internet: <http://news.sel.sony.com/pressrelease/print/1473>
5. Бузук В.В., Вергилес С.А., Гусаченко А.В. и др. Особенности построения оптических систем низкоуровневых телевизионных камер // Вестник СГГА – выпуск 7 – 2002 – С.152-156.

© П.А. Алдохин, А.С. Рафаилович, 2005

УДК 528.4

А.П. Майоров

ИЛФ СО РАН, Новосибирск

П.П. Шамаев

ИГАиБМ СО РАН, Якутск

ЛАЗЕРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ АЛМАЗНОГО МАТЕРИАЛА

Специализированная лазерная технологическая установка предназначена для размерной обработки алмазного материала и «сверления» отверстий в алмазных камнях.

Технические характеристики:

Длина волны излучения лазера –	1.064 мкм
Характер излучения –	импульсный
Частота излучения импульсов –	600 Гц
Длительность импульса излучения –	20 нс
Энергия импульса – не менее	3 мДж
Средняя мощность излучения – не менее	1,8 Вт
Потребляемая эл. мощность – не более	3,5 кВт
Система охлаждения -	автономная
Напряжение питания -	380 В
Габаритные размеры установки –	1200x1400x1000мм
Масса установки –	140 кг



Функциональная схема лазерной установки для изготовления алмазных фильер

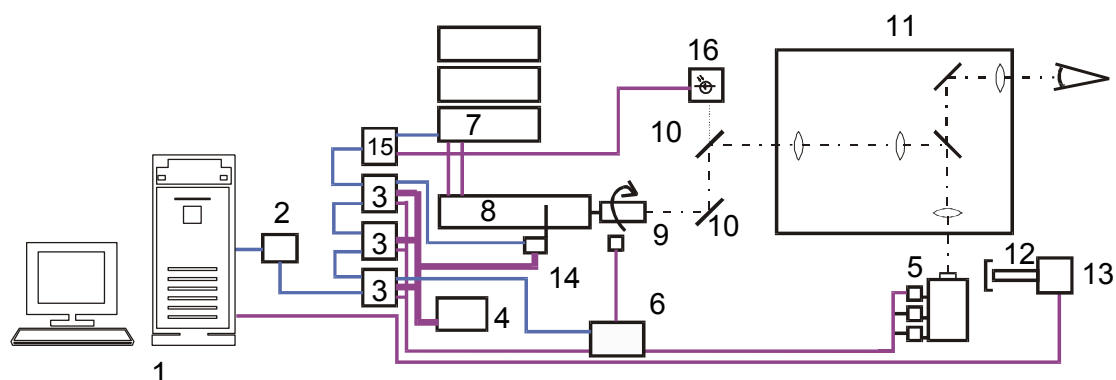


Рис. 1

1. Компьютер (системный блок, монитор), 2. Адаптер RS232-RS485, 3. Драйверы шаговых двигателей, 4. Источник питания шаговых двигателей, 5. Шаговые двигатели ДШИ 200-1, 6.

Коммутационное реле, 7. Источник питания лазера, 8. Излучатель, 9. Ослабитель, 10. Поворотные зеркала 45° на 1.064 мкм , 11. Система оптического контроля, 12. Объектив $\times 7$ + фильтр на 1.064 мкм , 13. CCD-матрица, 14. Шторка, 15. Синхронизатор, 16. Измеритель энергии.

Излучатель установки, выполненный по оптической схеме со встроенным интерферометром Саньяка, обеспечивает одномодовую генерацию стабильных импульсов.

Ослабитель, управляемый шаговым двигателем, поддерживает среднюю мощность излучения в соответствии с программой управления. Средняя мощность излучения измеряется встроенным фотоприемником.

Система наведения, выполненная на базе серийной системы оптического контроля СОК-1 с модернизированным объективом, позволяет точно

позиционировать материал обработки в фокальной плоскости и фокусировать излучение в пятно размером 30 микрон.

Координатная 3D система с кулачковым механизмом, управляемым шаговыми двигателями, обеспечивает перемещение обрабатываемого материала в фокальной плоскости объектива с точностью 3 микрона на шаг.

Автономная система охлаждения производит охлаждение рабочих частей излучателя без подключения внешнего контура воды.

CCD камера транслирует на монитор процесс обработки.

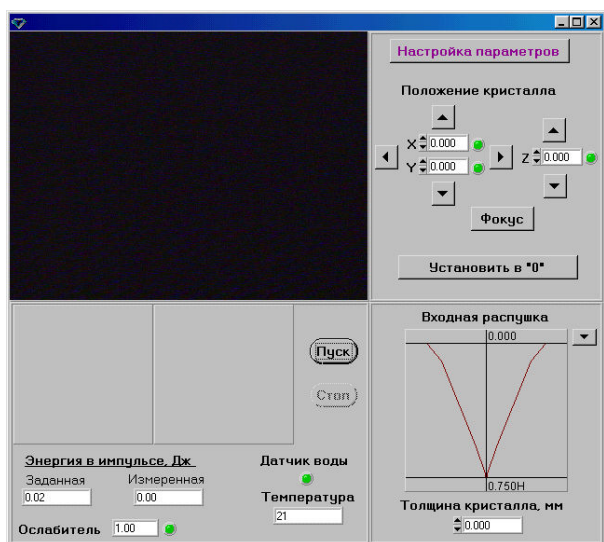


Рис. 2. Рабочий экран монитора



Рис. 3. Фрагмент изображения камеры

Программа управления позволяет вести обработку алмазного материала в автоматическом режиме.

© А.П. Майоров, П.П. Шамаев, 2005

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ДВОЙНОЙ РАСТРОВЫЙ МОНОХРОМАТОР

Для решения целого ряда задач физики атмосферы и океана, аналитической химии, биохимии, медицины, экологии и других отраслей необходимо регистрировать протяжённые спектры, имеющие достаточно слабые линии, с высоким спектральным разрешением. Так, например, для обеспечения регистрации колебательной структуры электронных спектров молекул при исследованиях верхних слоёв атмосферы, спектральное разрешение должно составлять около 0,1 нм, а интенсивность излучения при этом может быть менее 10^{-7} Вт/см²·ср [1].

Эта задача осложняется ещё и тем, что время сканирования спектра зачастую тоже ограничено. Поэтому применить классический дифракционный спектральный прибор не всегда возможно. Обладающие более высокими светосилой и величиной отношения сигнал/шум фурье-спектрометры, имеют более сложную, в технологическом плане, конструкцию, а изображающие спектральные приборы, построенные по схеме спектрографа, зачастую не позволяют идентифицировать слабую спектральную линию вблизи более интенсивной линии.

Наиболее оптимальным решением может быть создание прибора, работа которого основана на принципах растровой спектроскопии [2]. Отличительной особенностью растровых спектрометров, сравнительно с высокосветосильными спектральными приборами других типов, является простота конструкции и, следовательно – относительно низкая стоимость. В общем случае растровый прибор представляет собой дифракционный спектрометр, щели которого заменены наборами щелей – растрами. Квазимонохроматическое излучение в таком приборе проводится несколькими расположенными вблизи путями, в результате чего геометрический фактор прибора возрастает в разы. Подобное конструктивное решение позволяет существенно сократить время сканирования спектра, повысив при этом чувствительность прибора и сохранив высокое спектральное разрешение.

Оптическая схема малогабаритного монохроматора растрового спектрометра представлена на рис. 1.

Монохроматор двойной растровый, построен по схеме со сложением дисперсий (хотя, в принципе, он может строиться и по схеме с вычитанием дисперсии). Дифракционные решётки в каждой из двух половин монохроматора работают по автоколлимационной схеме с двойной дифракцией пучка.

Исследуемое излучение, проходит через входной растр 1 (под растром подразумевается набор размещённых определённым образом входных щелей) и отразившись от поворотного зеркала 2, коллимируется объективом 3.

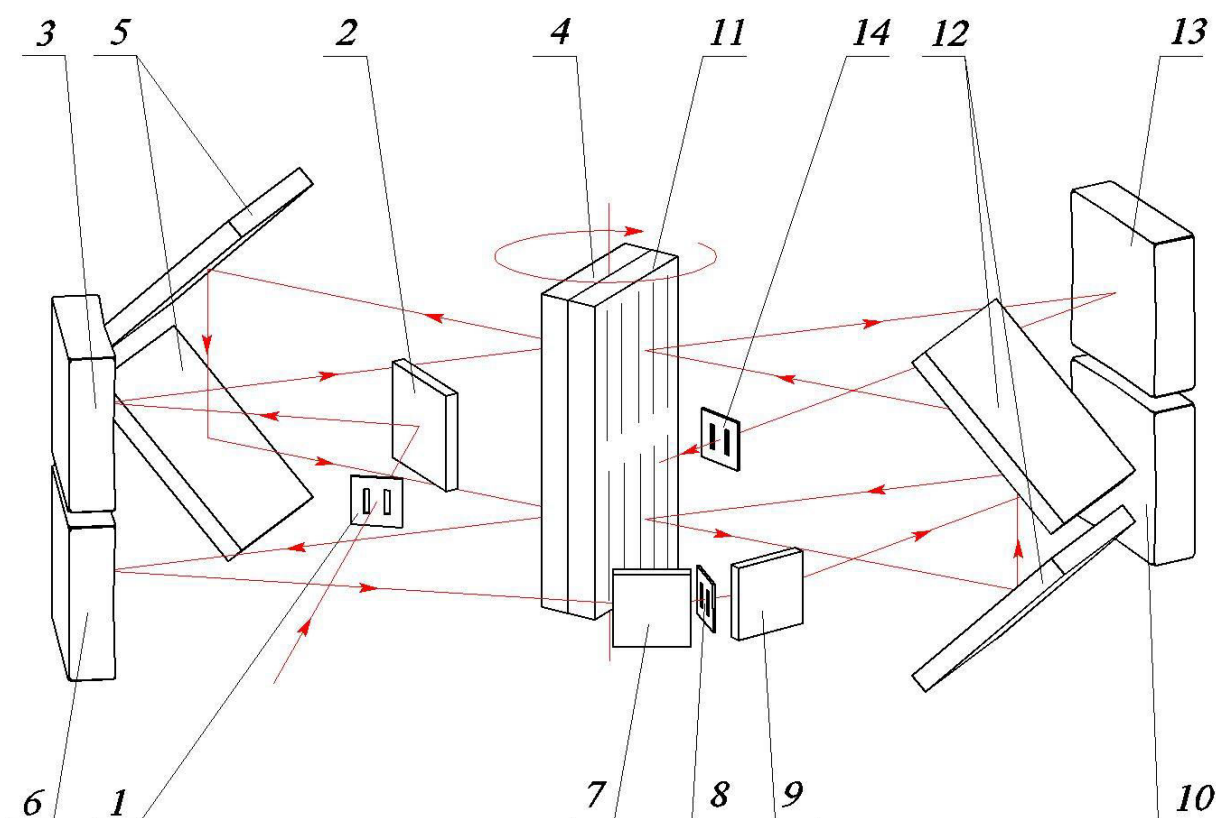


Рис. 1

Объективом 3 является внеосевой параболоид. Коллимированное излучение направляется на верхнюю часть дифракционной решётки 4. Диспергированное излучение, пройдя через систему зеркал 5, попадает на нижнюю часть дифракционной решётки 4, где диспергируется вторично, после чего квазимонохроматичное изображение входного раstra строится в плоскости промежуточного раstra 8 при помощи объектива 6 и поворотного зеркала 7. Прошедшее через растр 8 излучение, при помощи поворотного зеркала 9 направляется на коллимирующий объектив 10. Коллимированное излучение диспергируется нижней частью дифракционной решётки 11. Отразившись от системы зеркал 12, излучение вторично диспергируется верхней частью дифракционной решётки 11. Монохроматическое изображение промежуточного раstra строится объективом 13 в плоскости выходного раstra 14. Сканирование по спектру осуществляется одновременным поворотом дифракционных решёток 4, 11 и систем зеркал 5, 12 вокруг вертикальной оси.

Предложенная схема монохроматора спектрального прибора отличается малыми габаритами и высокой светосилой.

В оптических схемах растровых спектрометров, как правило, предъявляются более строгие требования к исправлению aberrаций.

Достаточно малые габариты, сравнительно с традиционными схемами растровых спектрометров, а, следовательно, и размеры растров позволяют задаваться меньшими требованиями к исправлению aberrаций оптической схемы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. С.Ф. Горбачев, Л.Г. Демидова, В.Н. Колесников и др. Компактный УФ спектрометр для зондовых исследований верхних слоев атмосферы // Оптический журнал – том 67, №3 – 2000 г. – С. 74–79
2. В.Б. Шлишевский. Методы светосильной растровой спектроскопии // Оптический журнал – том 69, №5 – 2002 г. – С. 56–69

© А.С. Рафаилович, В.Б. Шлишевский, 2005

УДК 681.785

А.С. Рафаилович

СГГА, Новосибирск

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПАРАМЕТРЫ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Ультрафиолетовая (УФ) область оптического диапазона длин волн занимает участок от 1 до 400 нм. Границы этого участка достаточно условны. Так, коротковолновая часть слегка перекрывает рентгеновскую, а длинноволновая – видимую области длин волн. УФ диапазон, в свою очередь, делится на следующие поддиапазоны:

- А (от 400 до 315 нм);
- В (от 315 до 280 нм);
- С (от 280 до 175 нм);
- V (короче 175 нм).

Одна из основных причин, влияющих на количество лучистой энергии достигающей поверхности Земли, – угловая высота Солнца.

Изменение угла возвышения Солнца над горизонтом в течение светового дня показано на рис. 1. Типичное дневное изменение суммарного приземного уровня УФ излучения для длины волны 323,8 нм приведено на рис. 2 [1].

В течение года интенсивность УФ излучения доходящего до границы атмосферы, изменяется на 6,6% из-за изменения расстояния между Солнцем и Землей.

Среда, в которой распространяется оптическое излучение, оказывает на него заметное влияние. Оно выражается в ослаблении излучения, изменении сигнала по спектру, пространственной структуре, во времени. Рассмотрим особенности распространения излучения в атмосфере Земли.

Ослабление излучения при прохождении через атмосферу происходит в результате двух основных процессов [4]:

- Поглощения излучения;
- Рассеяния излучения молекулами газов и аэрозолями.

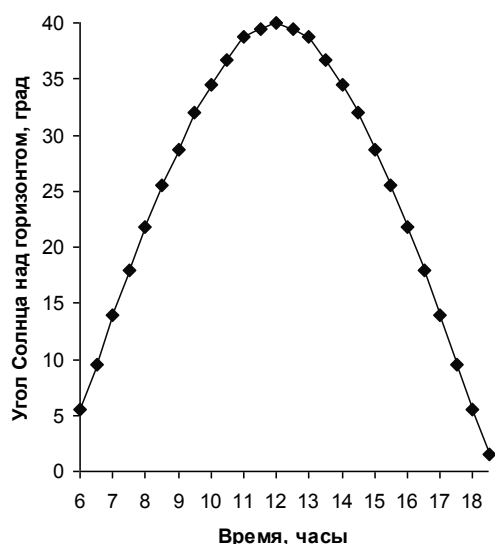


Рис. 1

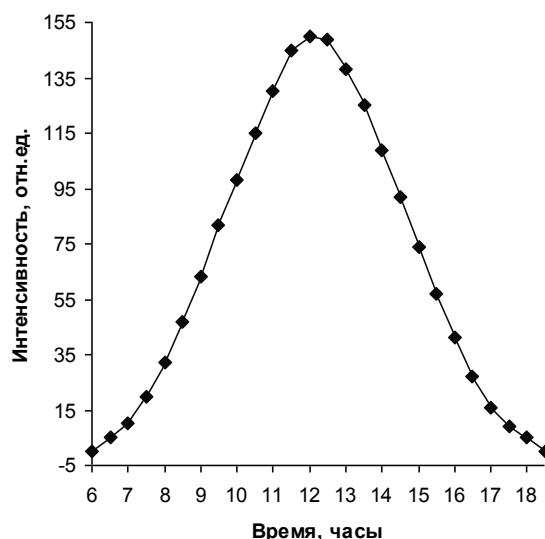


Рис. 2

При поглощении кванта излучения молекулой газа электроны переходят с одного энергетического уровня на другой. Кроме того, происходят изменения колебательной и вращательной энергии молекулы. Эти процессы приводят к образованию полос поглощения в спектре, а малые изменения колебательной и вращательной энергии создают тонкую структуру этих полос.

Земная атмосфера представляет собой смесь газов, состоящую на 78,09% из азота, 20,95% из кислорода, 0,93% аргона, 0,03% углекислого газа и около 0,01 % из других газов [2]. Эта смесь насыщена водяными парами и пылью. Из входящих в состав атмосферы газов наибольшим поглощением в УФ диапазоне обладают молекулы кислорода O_2 и озона O_3 .

Молекула озона образуется из молекулы кислорода O_2 . При попадании в молекулу O_2 кванта лучистой энергии с длиной волны от 176 до 192,5 нм (полоса поглощения Рунге–Шумана), она переходит в возбуждённое состояние. В случае тройного столкновения возбуждённой молекулы O_2 , атомарного кислорода и любой другой (третьей) молекулы возникает молекула озона O_3 . Результатом избыточного возбуждения колебательных уровней УФ излучением может явиться диссоциация (распад) молекул O_2 и O_3 .

Присутствующие в атмосфере кристаллы и капли воды тоже поглощают УФ излучение на длине волны около 219 нм. Кроме того, вода, взаимодействуя с озоном, препятствует диссоциации его молекул под воздействием УФ излучения, что существенно увеличивает количество поглощаемой озоном лучистой энергии [3].

Количество озона в атмосфере в зависимости от различных условий может изменяться примерно в 2 раза, кроме того, оно изменяется и с географической широтой. В северных полярных широтах количество озона относительно велико, но далее к югу оно постепенно убывает, достигая минимума в области между 35° с.ш. и 35° ю.ш., затем нарастает, и вторичный максимум приходится на область между 50° и 60° ю.ш. Над Антарктидой содержание озона опять уменьшается. Количество озона изменяется и в течение года. В средних

широтах северного полушария наибольшее содержание озона в середине марта, а наименьшее в октябре. В течение суток содержание озона также может меняться, и амплитуда этих изменений сравнима с амплитудой широтных и сезонных вариаций. Типичное распределение количества атмосферного озона в зависимости от высоты показано на рис. 3 [4].

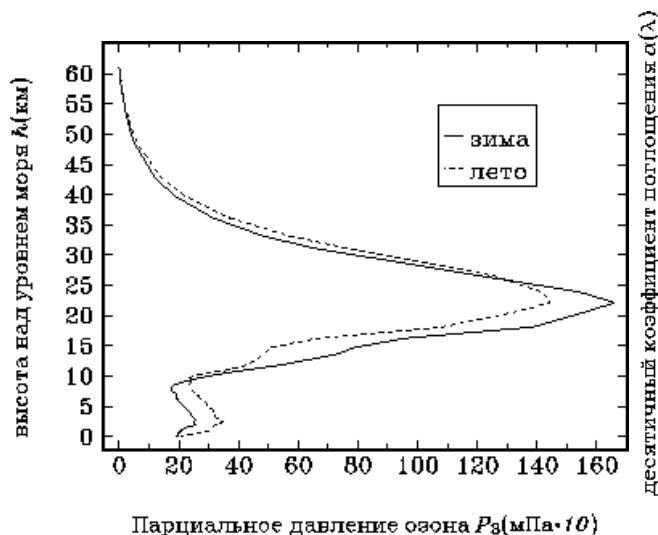


Рис. 3

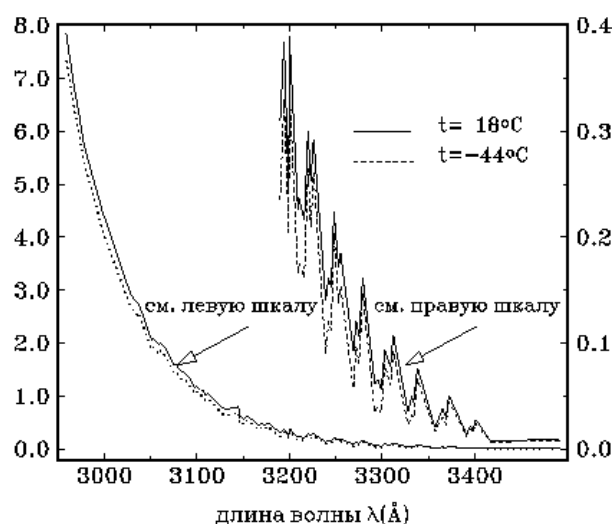


Рис. 4

Основная полоса поглощения озона – полоса Хартли (Hartley) от 202 до 297,2 нм. Максимум поглощения для этой полосы находится на 255,2 нм. В диапазоне от 300 до 345 нм лежит область полос поглощения Хьюгинса (Huggins). Коэффициенты поглощения излучения озоном для полос Хартли и Хьюгинса в зависимости от длины волны показаны на рис. 4 [3].

Только небольшая доля рассеянного излучения короче 290 нм может присутствовать в верхних слоях атмосферы. Около поверхности Земли УФ излучение менее 290 нм практически отсутствует. Поэтому при наблюдении из космоса в этом диапазоне Земля выглядит как абсолютно чёрный диск, и любой светящийся объект на этом фоне контрастен. В диапазоне от 290 до 340 нм атмосфера имеет резко (экспоненциально) нарастающую прозрачность.

В диапазоне от 340 до 400 нм прозрачность по-прежнему высокая, но спектр излучения, проходящего через атмосферу, содержит относительно слабые полосы поглощения нескольких атмосферных газов. По этой причине изменчивость потоков УФ излучения в области А не связана с динамикой общего содержания озона в атмосфере и облачности, а обусловлена в основном изменениями аэрозольной составляющей атмосферы и активностью Солнца.

Альbedo подстилающей поверхности (отношение количества отражённого от поверхности излучения к падающему) оказывает значительное влияние на количество УФ радиации. Так снег обладает высоким (около 54 – 77 %) альbedo в УФ диапазоне [5]. Поэтому в регионах с длительным устойчивым снежным покровом в зимнее время количество рассеянного УФ излучения значительно, особенно при наличии облачности, из-за переотражения от снега и облаков. В пределах пограничного слоя атмосферы, с увеличением высоты полёта, альbedo

подстилающей поверхности в УФ области спектра имеет тенденцию к увеличению [6].

Наибольшее ослабление потока УФ излучения происходит при наличии облаков нижнего яруса. В этом случае величина ослабления может достигать 90%. Однако, при наличии снежного покрова количество рассеянного УФ излучения может значительно увеличиваться [5].

При ясном небе интенсивность рассеянного УФ излучения зимой превышает аналогичное летнее значение в среднем на 22 – 27 % в области А и на 3 – 9 % – в области В. При увеличении количества облаков и понижении яруса облачности наблюдается рост превышения зимних значений интенсивности над летними. В то же время в условиях сплошной облачности в области А для облаков верхнего и среднего ярусов наблюдается увеличение рассеянного УФ излучения, по сравнению с ясным небом. Это происходит как при малых, так и при больших углах возвышения Солнца, причём для больших углов возвышения это увеличение достигает 20 – 29 %. В области В подобное увеличение наблюдается только при наличии облаков верхнего яруса, в то время, как облака среднего и нижнего ярусов ослабляют излучение в области В значительно сильнее, чем в области А [5].

Обычные для Западной Сибири отклонения интенсивности УФ излучения в течение года от среднегодовых значений [5] приведены на рис. 5.

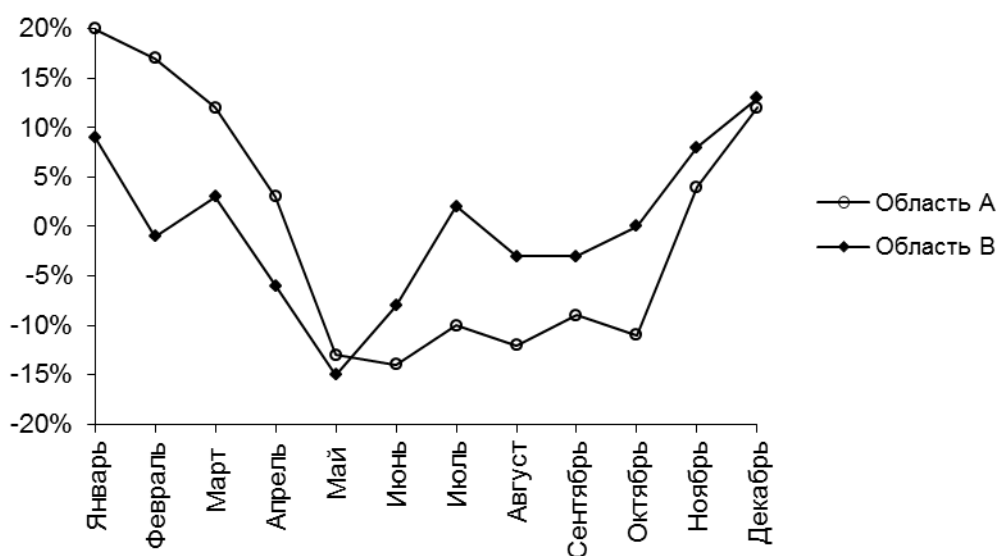


Рис. 5

Для обеспечения регистрации электронно-колебательной структуры молекул газов в атмосфере спектральное разрешение исследовательской аппаратуры должно составлять не менее 0,1 нм. Пороговая чувствительность приемников должна обеспечить регистрацию интенсивность излучения до 10^{-7} Вт/см²·ср·мкм [7].

Источниками УФ излучения могут являться объекты искусственного происхождения, например, факел, образующийся в результате сгорания ракетного топлива, свечение атмосферных газов вокруг оболочки космического аппарата (КА) и быстро движущихся в атмосфере объектов и др.

Спектральная аппаратура для изучения спектроэнергетических характеристик факельной струи должна работать в диапазоне от 200 нм и иметь спектральное разрешение от 10^{-3} (для решения задач диагностики ракетных двигателей) до 0,1 нм (для распознавания удалённого перемещающегося факела). Пороговая облучённость входного зрачка может быть при этом порядка 10^{-8} Вт/см². [8]

Энергетическая яркость приповерхностного свечения КА в УФ диапазоне имеет более высокие значения по сравнению со свечением в видимом [9]. В основном, свечение обусловлено образованием на поверхности КА электронно-возбуждённых молекул NO*. Яркость приповерхностного свечения возрастает при увеличении солнечной активности. Значения интегральной яркости полос в УФ диапазоне составляют от 10^{-8} до 10^{-5} Вт/м²·ср. Спектральное разрешение аппаратуры для изучения подобных явлений должно быть от 0,1 до 0,4 нм.

Динамический диапазон аппаратуры, должен достигать около 6 –7 порядков, так как, например, при снижении с 1000 до 50 км поток излучения возрастает до 6 порядков [9].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.Ю. Шалин. Приземный солнечный ультрафиолет в Прибайкалье // <http://bsfp.iszf.irk.ru/bsfp1999/bsff3/bb08bn3.php>
2. Internet: http://www.ssga.ru/erudites_info/vozd_ocean/vozdushny_okean2.html
3. Ю.В. Новаковская. Ультрафиолетовое излучение и роль воды в озоновом слое земли // <http://www.chemnet.ru/rus/events/lomonosov/13.html>
4. А.В. Миронов. Прецизионная фотометрия. Практические основы прецизионной фотометрии и спектрофотометрии звезд // <http://www.nature.ru/db/msg.html?mid=1159114&uri=node29.html>
5. М.В. Винарский. Исследование изменчивости потоков ультрафиолетовой радиации на поверхности Земли // Автореферат канд. дисс. г. Томск. 2002 г. 22 с.
6. Ann R. Webb and al. Airborne spectral measurements of surface reflectivity at ultraviolet and visible wavelengths // Journal of Geophysical Research, Vol. 105, №D4, 2000
7. А.И. Ефремов и др. Измерение излучения лимба над дневным диском Земли в УФ диапазоне бортовым спектрометром «Бриз» // Оптический журнал, том 69, №11, 2002
8. Е.П. Андреев, А.Н. Дубровин. Спектроскопия факела как инструмент диагностики ракетных двигателей // Оптический журнал, том 69, №11, 2002
9. А.А. Каменев и др. Моделирование яркости приповерхностного свечения низкоорбитальных космических аппаратов в видимом и ультрафиолетовом диапазонах для условий максимума и минимума солнечной активности // Оптический журнал, том 71, №4, 2004

© А.С. Рафаилович, 2005

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ БЫТОВОЙ ОСВЕТИТЕЛЬНЫЙ ПРИБОР

Бытовой осветительный прибор с голографическим рассеивателем предназначен для освещения бытовых, общественных и офисных помещений. В качестве рассеивающих свет элементов использованы пропускающие дифракционные решетки или голограммы. Из пропускающих голограмм, восстанавливающих изображения реальных объектов белым светом, широко известны голограммы С. Бентона [1], по-другому называемые «радужные» голограммы. Они, в отличие от пропускающих голограмм Лейта и Упатниекса [2], создают чёткие изображения реальных объектов при восстановлении белым светом. Однако не меньший интерес представляют не только изображения реальных объектов, но и изображения абстрактных фигур, как полностью отсутствующих в природе, так и значительно искаженных, но отдаленно их напоминающих. Если при записи пропускающих голограмм использовать схему Лейта и Упатниекса, получаемые голограммы, при восстановлении их белым светом, раскладываются в спектр и мультиплицируются, размазывая изображения записанных объектов. Однако ряд интересных с дизайнерской точки зрения изображений можно записать именно в этой схеме. При этом изображения могут создаваться мультиплицированием какого-либо элементарного изображения, аналогично мультиплицированным картинкам, создающим объемные изображения методом дивергенции оптических осей [3]. Для этого надо только удовлетворять дополнительным соотношениям, определяющим пропорции между шагом мультиплицированного элемента, углом дифракции и одним из линейных размеров схемы восстановления.

Одним из интересных примеров таких голографических рассеивателей является полученная записью 4х сферических фронтов кросс-дифракционная решетка [4]. Она мультиплицирует изображение нити накала обыкновенной лампы и одновременно разлагает изображение в спектр. При выдерживании определенных отношений между расстоянием от точечных источников и голограммой, размером нити накаливания у источника света в бытовом осветительном приборе, а также размером его рассеивателя, можно достигать различных художественных эффектов.

Яркой и притягательной является получаемая в такой схеме радужная картинка, очень похожая на картины северного сияния или знакомой всем радуги. Она буквально притягивает взгляд, производя положительное эмоциональное воздействие на человека своими сочными и чистыми тонами, ассоциирующимися с яркой радугой после летнего дождика.

Это только один из конкретных примеров построения голографических изображений отсутствующих во время записи голограммы объектов. Аналогично, несколько меняя параметры схемы записи, можно записывать изображения, получившие у разработчиков условное название «ёжик». Это тоже радужная картинка, состоящая из мультиплицированного набора радужных пирамид, расходящихся из единого центра. Причем, изображение

можно записывать как ортоскопическое, так и как псевдоскопическое. При этом можно добиваться формирования изображения этого «ёжика» как наблюдаемого за стеклом голографического рассеивателя, так и перед этим стеклом. Последнее производит особенно сильное впечатление на человека, т. к. фактически он видит то, что не может потрогать руками. Противоречие между двумя органами чувств (зрением и осязанием) всегда очень сильно влияет на эмоциональное восприятие человека.

В целом предложенная разработчиками методика записи отдельных голографических изображений в схеме Лейта и Упатниекса и восстановления их в белом свете позволяет создавать оригинальные картины трехмерных, как ортоскопических, так и псевдоскопических, изображений, не существовавших во время записи этих голограмм. На основе проведенного патентного поиска [5] сделан вывод о том, что практически каждая голографическая схема записи таких изображений патентоспособна.

Ближайшим аналогом на сегодняшний день являются отражательные голограммы Денисюка. Такие голограммы тоже создают различные ортоскопические и псевдоскопические изображения реальных объектов. Однако они требуют освещения специальными прожекторами, освещающими голограмму с той же стороны, где находится наблюдатель (часто над его головой). Наиболее распространен метод отдельного размещения голограммы, а на некотором расстоянии от неё, на противоположной стене или потолке – специального прожектора. Это существенно затрудняет конструирование на основе голограмм Денисюка бытовых осветительных приборов.

Другим аналогом является наиболее часто встречающаяся схема бытовых осветительных приборов, содержащая источник света и рассеиватель, расположенные таким образом, чтобы рассеиватель находился между источником света и глазом человека. Это позволяет исключить фокусировку глаза на ярком теле накала источника света. Чаще всего применяются матовые рассеиватели, иногда с рисунком или узором. Все они предназначены для создания мягкого, ровного освещения.

Использование средств голографии для создания рассеивателей бытовых осветительных приборов на сегодня в мировой практике отсутствует. Это видно, например, при анализе каталогов QUELLE, PHILIPS и других ведущих производителей бытовой осветительной техники. Возможно, это связано, с одной стороны, с технологическими трудностями использования классической схемы Стефана Бентона при серийной записи (или мультиплицировании) пропускающих голографических рассеивателей, а с другой стороны, с указанными выше конструктивными трудностями выполнения осветителей в одном блоке с голограммами Денисюка.

Предлагаемые пропускающие голографические решетки [4, 5], создающие трехмерные абстрактные изображения, имеют гораздо более простую конфигурацию, проще записываются и тиражируются. Однако и при этом в первую очередь следует решить проблему серийного выпуска голографических дифракционных решеток. Мировой опыт крупносерийного выпуска голограмм ограничивается рельефно-фазовыми голограммами С. Бентона [6] и

отражательными голограммами фирмы DU PONT [7]. И те и другие ограничиваются размерами до нескольких квадратных сантиметров. Ключевым вопросом создания таких голографических бытовых осветительных приборов является сегодня организация выпуска пробных, сравнительно больших, партий голографических дифракционных решеток или, по крайней мере, выбор одного из двух предполагаемых путей тиражирования.

Первый связан с применением традиционных фотопроцессов в сочетании с принципом блочной химической обработки, аналогично блочной технологии, применяемой при серийном выпуске микросхем, когда одновременно в одной технологической цепочке и на одном оборудовании обработке подвергается определенное количество одинаковых заготовок.

Второй путь связан с проработкой вопросов создания специализированного аппарата тиражирования, который в последовательном режиме, с применением фотопроцессов или без, позволит наладить конвейерный выпуск больших партий голографических дифракционных решеток. Разработчики считают, что принципиальных противоречий нет ни в том, ни в ином случае, однако какому из двух путей отдать предпочтение – сегодня однозначного ответа нет. Такое производство (технологическую установку серийного выпуска голографических дифракционных решеток) планируется разработать и создать в ближайшее время. Авторы с благодарностью отнесутся к предложениям о сотрудничестве в технической и коммерческой областях, направленным на продвижение настоящего проекта.

Одновременно планируется работа в области создания голографического дизайна помещений, как бытовых и служебных (в т. ч. театральных), так и специальных, для психологической разгрузки и даже для использования в лечении психологических и других заболеваний [8].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hologram Reconstructions with Entered Incoherent Sources. Stephen A. Benton. Research Laboratories, Polaroid Corp., Cambridge, Massachusetts 02139 and Harvard University, Cambridge, Massachusetts 02138.
2. Leith E.N., Upatnieks J., *Jorn. Opt. Soc. Amer.*, 52, 1123, 1962.
3. Волшебный глаз, М., Эгмонт Россия Лтд", 2002.
4. Шойдин С.А., Кондаков В.Ю., Свидетельство на полезную модель РФ № 29359 от 10.05.03
5. Шойдин С.А., Кондаков В.Ю., Дифракционная решетка и способ её изготовления. Патент РФ № 2242776 от 20.12.2004.
6. Гальперн А. Д., Калинина И. В., Селявко Л. В., Смаев В. П. О получении рельефно-фазовых голограмм на фотопластинках ПЭ-2 и их копировании // *Оптика и спектроскопия*. – 1986.- Т.60.- С.1040.
7. Du Pont Magazine, Wilmington, №3, 1997, p.9.
8. Казначеев В.П. Выживание населения в России, Новосибирск, 2002г

© С.А. Шойдин, В.Ю. Кондаков, 2005

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ПРИЦЕЛ - ЦЕЛЕУКАЗАТЕЛЬ

Голографический прицел-целеуказатель предназначен для точного наведения прибора на цель, будь то устройство дистанционного зондирования, измеритель дальности, или спортивно-охотничий прицел для спортивной пулевой стрельбы по неподвижной и движущейся цели. Также прицел может быть использован для целеуказания, например, в геодезии, аэрофотосъемке, судовождении и т.п.

Известным функциональным аналогом голографического прицела является лазерный прицел, в котором луч лазера направляется непосредственно на цель. Как голографический, так и лазерный прицелы обладают преимуществом перед традиционными прицелами, заключающемся в том, что у них отсутствует необходимость совмещения на одной линии мушки, планки, цели и глаза стрелка.

Прицеливание происходит «естественно», без необходимости аккомодации глаза на разные расстояния.

Основным элементом голографического прицела является отражательная голограмма, формирующая изображение прицельной марки на расстоянии практической бесконечности (порядка ста метров перед прицеливающимся). Кроме голограммы, в конструкцию прицела входит также светодиодный излучатель. Использование светодиодного излучателя обусловлено тем, что при использовании лазерного полупроводникового излучателя возможно снижение дифракционной эффективности голограммы в диапазоне рабочих температур, связанное с изменением длины волны лазерного излучателя при постоянстве селективных свойств голограммы.

На качество изображения прицельной марки наряду с оптическими aberrациями влияет и конечность геометрических размеров восстанавливающего изображение прицельной марки источника излучения. Следует отметить тот факт, что если влияние оптических aberrаций можно минимизировать на стадии записи голограммы, например, осуществляя запись голограммы в схеме с корректором оптических aberrаций, то влияние геометрических размеров источника восстанавливающего излучения компенсировать не удастся никакими другими мерами, кроме как его ограничение с помощью диафрагмы или ограничение размеров светящегося тела светодиода.

Авторами установлено соотношение между минимальным размером источника излучения и расстоянием от источника излучения до голографического элемента, необходимое для поддержания достаточного для практических целей качества изображения прицельной марки. Использование в конструкции голографического прицела сверхярких светодиодов типа «ИРС» позволяет решить возникающую при ограничении размеров светящегося тела проблему нехватки яркости изображения прицельной марки.

УДК 681.7

К.П. Шатунов, А.А. Барин

КТИ ПМ СО РАН, Новосибирск

Л.В. Тымкул

СГГА, Новосибирск

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТИВОВ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ

В настоящее время к тепловизионным приборам предъявляются повышенные требования по чувствительности и разрешающей способности. Для испытания и определения характеристик, разрабатываемых инфракрасных (ИК) объективов тепловизионных приборов необходимо создание контрольно-проверочной аппаратуры, обеспечивающей измерение заданных значений контролируемых параметров с достаточной степенью достоверности [1].

В соответствии с результатами проведенного анализа, в КТИ ПМ СО РАН на основе ранее созданных и создаваемых объективов для тепловизионных приборов разработан ИК микроскоп для контроля объективов тепловизионных систем. Объектив микроскопа рассчитан на длину волны 7 –12 мкм, для болометрической матрицы 320×240 пикселей, 160×120 пикселей. Увеличение микроскопа составляет 20 крат, относительное отверстие 1:1, фокусное расстояние 9,1 мм, передний фокальный отрезок 10,3 мм. Схема объектива микроскопа приведена на рис. 1.

Принцип действия схемы измерения приведен на рис. 2. Излучение от высоко - температурного абсолютно – черного тела (АЧТ), пройдя точечную диафрагму, попадает на исследуемый объектив, в фокальной плоскости которого установлен микроскоп. Объектив микроскопа строит дифракционный кружок рассеяния объектива в плоскости болометрической матрицы (Фирмы Raytheon 320x240, с размером пикселя 46,8мкм, либо Фирмы Indigo 160x120, с размером пикселя 50мкм).

Инфракрасный микроскоп смонтирован на столике, который установлен на оптической скамье. Столик микроскопа имеет подвижки вдоль координат X,Y, Z. Подвижки вдоль осей Z, Y осуществляются при помощи шаговых двигателей фирмы National Aperture, Inc. Управление перемещением шаговых двигателей осуществляется при помощи микроконтроллера National Aperture, Inc, который подключен к системному блоку.

Программа управления микроконтроллерами позволяет определить положение шаговых двигателей и задать им любое перемещение как шаговое, так и дискретное.

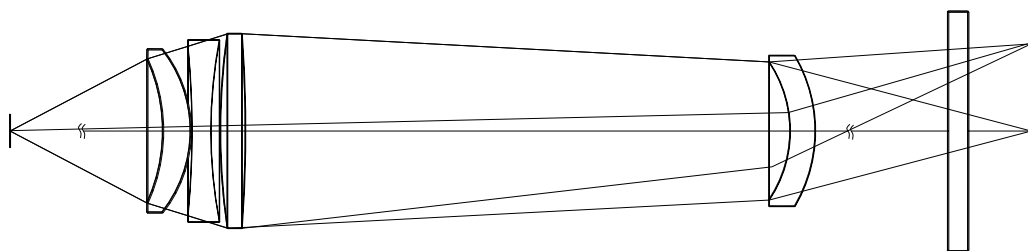


Рис. 1. Схема объектива микроскопа

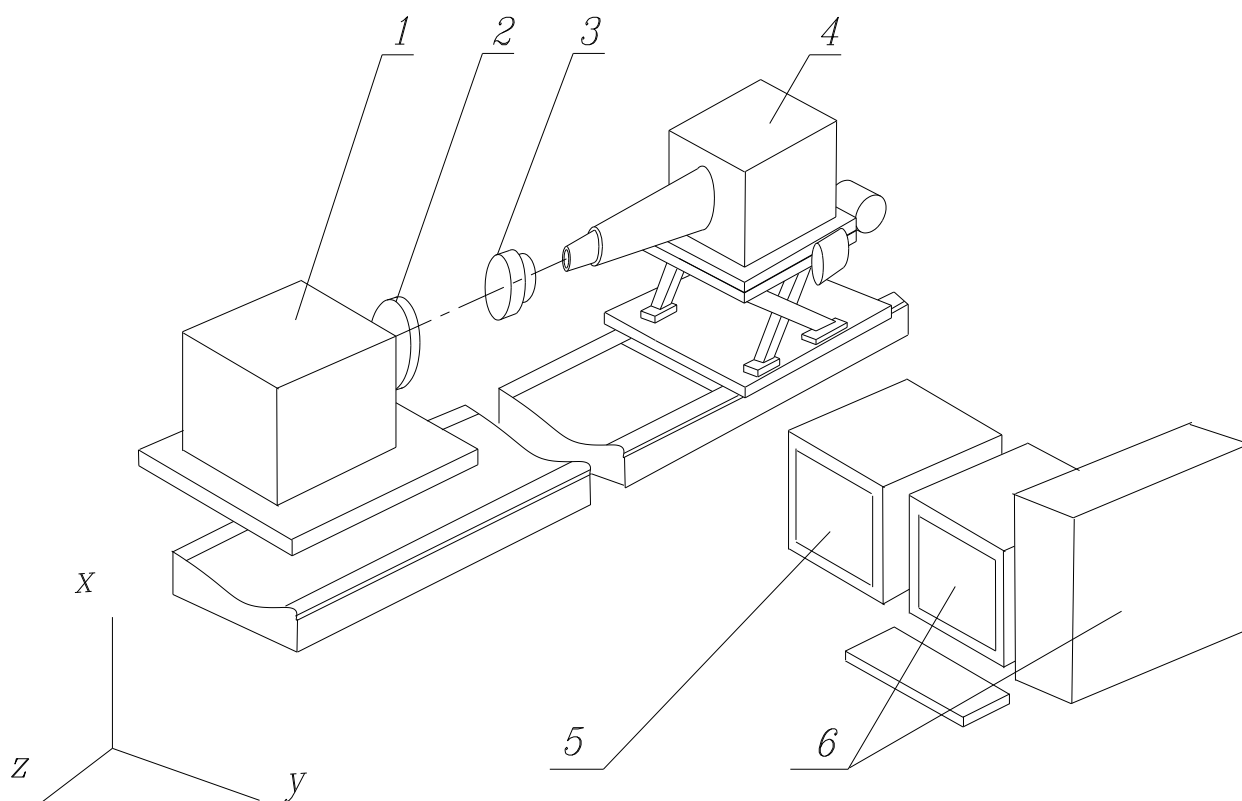


Рис. 2. Схема измерения характеристик инфракрасных объективов:

1 - высоко температурное черное тело; 2 – набор точечных диафрагм; 3 – исследуемый инфракрасный объектив; 4- инфракрасный микроскоп; 5 – TV монитор; 6 – системный блок.

Информация о пятне рассеяния измеряемого объектива поступает на TV монитор и на системный блок. На TV мониторе видны, форма и место

положения пятна рассеяния, а на системном блоке разрез, размер и трехмерная форма пятна рассеяния.

Таким образом, при помощи разработанной установки можно измерить пятно рассеяния объектива и его задний отрезок, что, в конечном счете, важно знать при сборке и юстировке прибора.

Данная схема может быть также использована для измерения температурно - частотной характеристики (ТЧХ) объектива. Для этого в схему устанавливается между АЧТ и исследуемым объективом зеркальный коллиматор [2]. Топология тест – объектов коллиматора представлена на рис. 3.

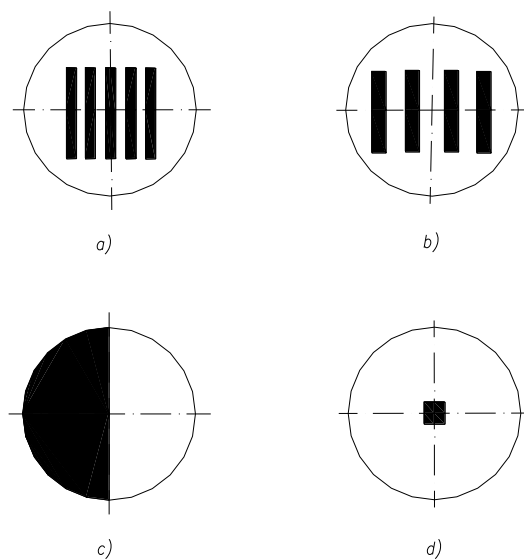


Рис. 3 – Миры зеркального коллиматора

Результаты измерений характеристик объективов тепловизионных систем дают возможность создавать более совершенную тепловизионную аппаратуру.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. – М.: Мир, 1988. – 500с.
2. ГОСТ 28953-91 Методы измерения параметров.

© К.П. Шатунов, А.А. Баринов, Л.В. Тымкул, 2005

ЛАЗЕРНЫЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ КОНТРОЛЯ КОЛЕСНЫХ ПАР ВАГОНОВ НА ХОДУ ПОЕЗДА

Обеспечение безопасности движения на железнодорожном транспорте требует замены субъективного ручного контроля за состоянием вагонных колесных пар на стопроцентный автоматический, более точный и объективный контроль. Однако технические средства, способные обеспечить такой контроль в реальных условиях эксплуатации подвижного состава в России, до недавнего времени отсутствовали.

Проводимые на железных дорогах России периодические осмотры колесных пар на пунктах технического обслуживания (ПТО) требуют значительных временных затрат, что существенно увеличивает время нахождения подвижного состава в пути. Поэтому существует необходимость создания автоматизированной бесконтактной системы диагностики, позволяющей в реальном времени на ходу поезда измерять основные параметры колесных пар.

Анализ отечественной и зарубежной литературы показал, что в России и за рубежом велись и ведутся работы в этом направлении. Так, существуют устройства, обеспечивающие контроль геометрических параметров колес в условиях депо [1], в условиях специализированных крытых полигонов [2], а также на перегоне при низкой скорости движения поезда в условиях отсутствия атмосферных осадков [3]. Однако на текущий момент не существует устройств, обеспечивающих контроль геометрических параметров колесных пар на ходу поезда в реальных условиях эксплуатации.

Исходя из этого, сформулирована задача создания системы автоматического контроля колесных пар на ходу поезда. Такая система предназначена для измерения геометрических параметров поверхности катания, а также выявления износа и дефектов цельнокатаных колес на ходу поезда, регистрации неисправностей колесных пар и оперативной передачи полученной информации на ближайший пункт технического обслуживания (ПТО). Система должна контролировать следующие параметры колесных пар (рис. 1) грузовых вагонов:

- Ширину обода (рис. 1 поз. а);
- Толщину обода (b) от 18 до 80 мм;
- Толщину гребня (с) от 20 до 33 мм;
- Сумму толщин гребней на оси;
- Диаметр по поверхности катания (D1, D2) 844 до 964 мм;
- Расстояние между внутренними гранями колес (e) от 1437 до 1443 мм;
- Равномерный прокат (f) от 0 до 10 мм;
- Разность диаметров колес в колесной паре $\Delta = D1 - D2$.

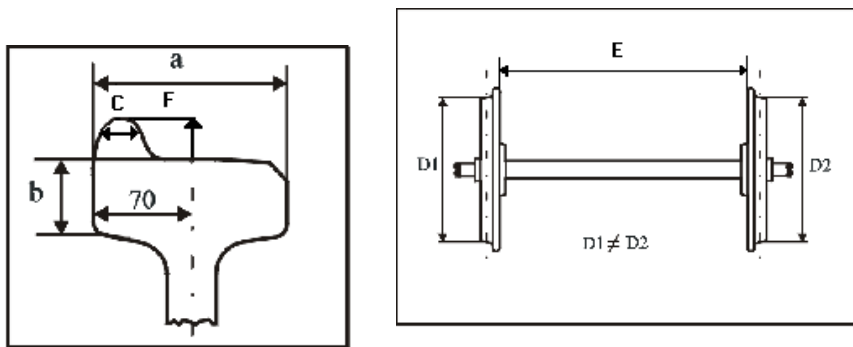


Рис. 1. Измеряемые параметры колесных пар

Измерение с погрешностью не более 0,5 мм необходимо производить при скоростях движения поезда от 15 до 60 км/час на перегоне при температуре окружающей среды от -50° до $+50^{\circ}$ при наличии запыленности и атмосферных осадков.

Для решения указанной задачи в КТИ НП СО РАН разработан лазерный комплекс [4] для автоматического контроля геометрических параметров колесных пар вагонов на подходах к станции (в дальнейшем - КОМПЛЕКС).

Ниже приведены способ контроля, структура и состав КОМПЛЕКСА, результаты испытаний и опытной эксплуатации.

1. Способ контроля геометрии колесной пары на основе самосканирования

В основу технического решения при создании КОМПЛЕКСА положен принцип самосканирования колесной пары (рис. 2) с использованием набора активных лазерных дальномеров (триангуляционного типа), при котором каждое из колес параллельно и независимо сканируется двумя измерительными датчиками - внутренним и наружным, установленными внутри рельсового пути и снаружи соответственно.

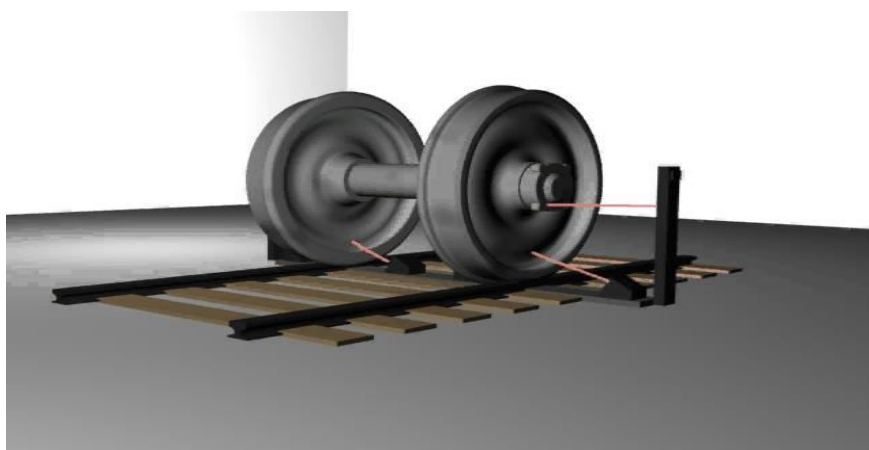


Рис. 2. Принцип самосканирования колесной пары

При движении колесной пары каждый из датчиков измеряет текущее расстояние до поверхности колеса (вдоль заданного направления измерения). В итоге формируются сигналы, отражающие текущий профиль колесной пары в

некотором сечении, угол и высота которого определяются направлениями измерения датчиков.

Данные сечения соответствуют сечениям колесной пары плоскостями, наклоненными к горизонтальной плоскости под некоторыми известными (заранее определенными) углами установки датчиков. Далее, эти сечения в системе отсчета датчиков, пересчитываются в общую (глобальную) ортогональную систему отсчета, в которой ось X направлена вдоль оси пути, ось Y – поперек оси пути, ось Z – вертикально вверх. Затем, получив координаты точек на поверхности колеса в глобальной системе координат и используя дополнительные параметры взаимного расположения датчиков, полученные при калибровке КОМПЛЕКСА, рассчитываются координаты точек в системе отсчета колеса. Таким образом, восстанавливается поперечное сечение (разрез) колесной пары. Типичный профиль восстановленного поперечного сечения приведен на рис. 3. Затем по восстановленному профилю вычисляются требуемые геометрические параметры, при этом алгоритм расчета параметров повторяет методику их измерения при помощи стандартного контактного инструмента.

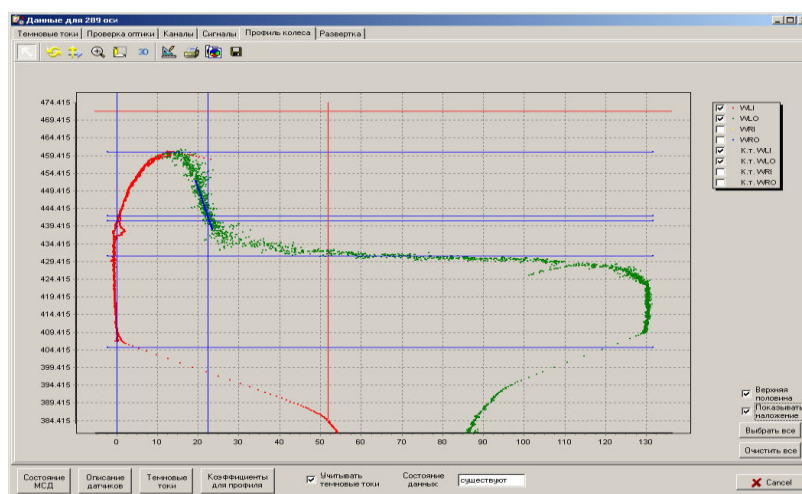


Рис. 3. Восстановленный поперечный профиль колеса

2. Структура и состав Комплекса

Для реализации данной задачи разработаны структура и состав комплекса, представленные на функциональной схеме (рис. 4) и включающие в себя напольное, постовое оборудование и АРМ оператора безопасности ПТО.

Напольное оборудование Комплекса смонтировано на железнодорожном пути на общей раме и включает в себя колесные наружные датчики (1 на рис. 4), датчики температуры (2), колесные внутренние датчики (3), датчики синхронизации (магнитные педали, 4).

Постовое оборудование КОМПЛЕКСА, устанавливаемое в отапливаемом помещении вблизи напольного оборудования, включает в себя блок управления и синхронизации (БУС, 5), два независимых модуля сбора данных (МСД) и сервер (6).

Управление работой КОМПЛЕКСА осуществляется блоком управления и синхронизации (БУС). Данный блок принимает сигнал о приближении поезда («Дальнее оповещение») от средств автоматики железной дороги и выдает сигнал серверу на подготовку к измерениям. Подготовка включает в себя тестирование измерительных датчиков и аппаратуры в целом. Далее, прохождение колесных пар по зоне контроля фиксируется при помощи магнитных педалей, по которым формируются импульсы начала (СТАРТ) и конца измерения (СТОП) для данной колесной пары. По сигналу СТАРТ модули сбора данных начинают фиксировать данные с датчиков и запоминать их в буфере до сигнала СТОП. После прохода поезда БУС формирует сигнал «Конец поезда». Получив данный сигнал, сервер переводит измерительные датчики в ждущий режим и принимает от модулей сбора данных накопленные блоки информации.

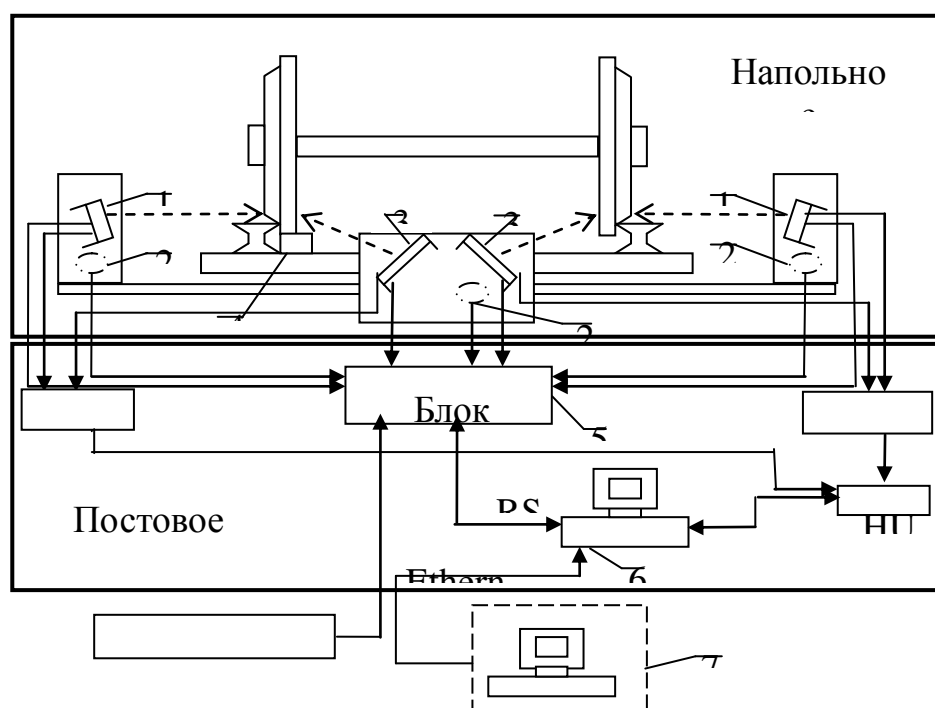


Рис. 4. Функциональная схема комплекса

3. Оптико-электронные измерительные датчики

Для реализации предложенного принципа измерения параметров колесных пар необходимы дальномеры, удовлетворяющие жестким требованиям. А именно, они должны обеспечивать измерение расстояния до движущейся поверхности с различными рассеивающими свойствами. Погрешность измерения должна быть порядка 0.1% и ниже, не допускается зависимости погрешности от типа поверхности. Быстродействие не менее 10^5 измерений в секунду. Измерения должны производиться в условиях сильных внешних помех и фоновых засветок, как постоянных, так и переменных.

Анализ показал, что не существует серийно выпускаемых датчиков с подобными характеристиками. По этой причине в рамках реализации проекта для использования в качестве дальномеров были разработаны, изготовлены и

протестированы лазерные датчики положения (ЛДП) триангуляционного типа (рис. 5).

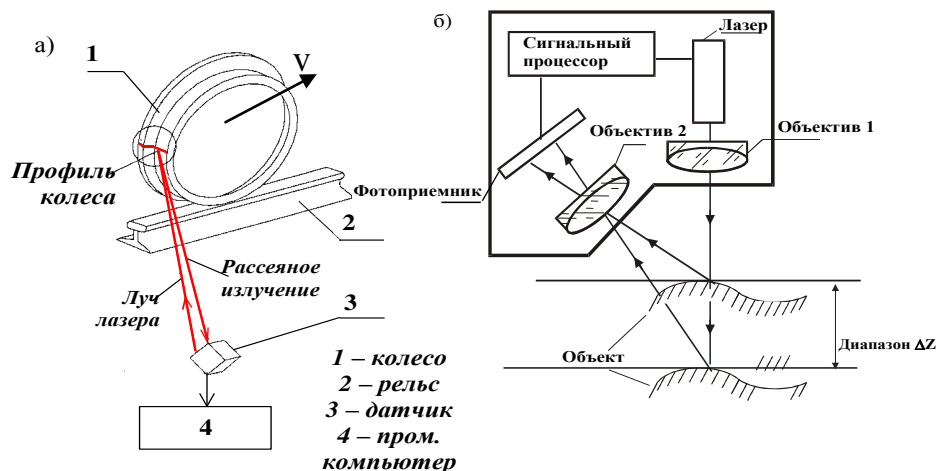


Рис. 5. Принцип действия системы контроля геометрических параметров колесных пар на ходу поезда (а), оптическая схема триангуляционного измерителя (б)

На поверхности колеса 1, движущегося по рельсам 2, фокусируется излучение лазерного диода измерительного датчика 3. Рассеянное излучение собирается апертурой приемного объектива, который строит изображение освещенного участка поверхности на позиционно-чувствительного фотоприемника. Сигнал от позиционно-чувствительного приемника фиксируется и обрабатывается промышленным компьютером 4.

Созданные датчики (модель Лабракон® ЛДП 170/410, рис. 6) имеют двухканальный аналоговый выход, (от 0 до 10 В), сигналы с которых поступают на входы платы АЦП модуля сбора данных. Аналоговые сигналы первого и второго каналов преобразуются в цифровой код. Затем вычисляется отношение разности сигналов с двух каналов АЦП к их сумме и по калибровочной таблице определяется координата контролируемой поверхности. Эта координата (поверхности колеса в системе отсчета датчика) используется далее для построения профиля колеса и расчета его геометрических параметров.

Датчики устанавливаются в закрепленные на жесткой раме термостабилизированные корпуса. Внутри корпуса поддерживается постоянная температура от 49 до 51°C. Корпус имеет шторки для защиты оптических каналов, которые используются также при самотестировании датчиков.

Разработанные датчики успешно прошли полный цикл государственных испытаний для целей утверждения типа средства измерения и внесены в госреестр средств измерений. Собственная погрешность датчиков при диапазоне измерения более 200 мм не превосходит 0,2 мм. Быстродействие датчика достигает 500 000 измерений в секунду.



Рис. 6. Датчик Лабракон® ЛДП 170/410

4. Результаты испытаний и опытной эксплуатации Комплексов

Первый экспериментальный образец КОМПЛЕКСА, реализующий контроль геометрических параметров, смонтирован и с 06.05.2002 года находится в непрерывной эксплуатации на 32 км нечетного подхода станции «Инская» (внешний вид системы приведен на рис. 7). За время эксплуатации (более 2 лет) КОМПЛЕКС показал надежную работу при различных погодных условиях, в том числе во время дождя и снега.



Рис. 7. Внешний вид системы Комплекс

Экспериментальные исследования точности и достоверности контроля проводились путем сравнения результатов автоматических измерений разработанным КОМПЛЕКСОМ и ручных замеров традиционным контактным способом на неподвижном поезде на ПТО. Результаты многократных сравнительных замеров подтверждают высокую стабильность и точность автоматических замеров в диапазоне скоростей движения поездов на участке контроля до 60 км/ч.

Проведенные измерения позволили оценить достоверность работы КОМПЛЕКСА и принципиальную возможность диагностики колесных пар на ходупоезда. Подтверждаемость показаний за первые месяцы работы составила от 50 до 80 % по различным параметрам. В процессе доработки напольной аппаратуры и программного обеспечения этот показатель был улучшен до 65 – 92 %.

В настоящее время в эксплуатации находится десять КОМПЛЕКСОВ, установленных на Западно-Сибирской, Московской, Восточно-сибирской, Забайкальской и Красноярской железных дорогах.

За время работы КОМПЛЕКСОВ проконтролировано более 31 млн. колес, сформировано более 325 тысяч тревожных сообщений, отцеплено более 14 тысяч вагонов.

Заключение

Предложенная концепция контроля геометрических параметров колесных пар в движении на основе самосканирования и использование лазерного триангуляционного метода, адаптированного для контроля движущихся объектов, позволила создать автоматическую оптико-электронную систему для контроля и диагностики колесных пар вагонов на ходу поезда.

Такой КОМПЛЕКС обеспечивает автоматический контроль толщины обода и гребня, диаметра колес и других параметров поперечного профиля колесной пары при скоростях движения до 60 км/ч в жестких климатических условиях (от – 50 до + 50 °С), что в полной мере отвечает требованиям эксплуатации. Результаты испытаний подтвердили надежную работу КОМПЛЕКСА в различных условиях окружающей среды и высокую достоверность контроля.

Применение созданных диагностических систем позволяет заметно повысить безопасность движения на железнодорожном транспорте.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. «Автоматическая диагностика колесных пар с помощью системы ARGUS»/ЖДМ, 2001, № 12// *G. Hauschild et al. Glasers Annalen*, 2000, № 12, S. 615-625.
2. «Оценка систем измерения колес»/ ЖДМ, 2003, № 11// *R. Morgan et al. Railway Track & Structures*, 2002, № 7, S 13-15.
3. «Измерение параметров колесных пар подвижного состава в движении»/ А.З. Венедиктов, В.Н. Демкин, Д.С. Доков// «ЖДМ», 2003, № 9.
4. Автоматический контроль геометрических параметров колесных пар во время движения поезда [Текст] /А.Н. Байбаков, В.М. Гуренко, В.И. Патерикин, СП. Юношев, С.В. Плотников, В.В. Сотников В.В., Ю.В. Чугуй // Автометрия. - 2004г. - Т. 40, № 5. - С. 94 - 103.

© С.В. Плотников, А.Н. Байбаков, В.М. Гуренко, В.И. Патерикин, С.П. Юношев, В.В. Сотников, Ю.В. Чугуй, 2005

**НОВЫЕ ГИПОТЕЗЫ О СТРОЕНИИ И ФУНКЦИОНИРОВАНИИ ПЕРВОГО ОТДЕЛА
ЗРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗАТОРА**

К зрению вообще и к устройству глаза у человечества интерес существовал давно. Первое описание строения человеческого глаза относится к 130-200 годам н.э. С тех пор накоплено много знаний об устройстве глаза, о совместной работе глаз и других отделов зрительного анализатора, психофизиологии зрения. Эти знания используются при проектировании оптических приборов, работающих с человеческим глазом, их пытаются использовать и при создании систем технического зрения. Однако успехи в этой области пока еще более чем скромные. Существующие теоретические и эмпирические модели, отражающие те или иные свойства зрительной системы человека и других живых существ, удовлетворительно описывают их свойства и ряд феноменов зрения. Однако накопилось и множество артефактов, которые существующие модели описать не в состоянии. Отметим некоторые из них.

Начнем со строения глаза. Оптическая система глаза является нецентрированной, это обстоятельство сильно затрудняет моделирование глаза в терминах геометрической оптики. Кроме того, известная аналогия строения глаза с устройством фотоаппарата не выдерживает критики при ближайшем рассмотрении. Действительно, если сравнивать сетчатку с фотопленкой в фотоаппарате, то “фотопленка” как бы заряжена светочувствительным слоем от фотографического объектива. Всем известно, что прежде чем свет в глазу попадает собственно на палочки и колбочки он проходит несколько слоев различной природы. Два слоя взаимно перпендикулярных нервных волокон, слой ганглиозных клеток, биполярные клетки, горизонтальные клетки. Если рассмотреть эволюцию органов зрения живых существ, то можно увидеть, что функции зрительного аппарата по мере эволюции развиваются, усложняются, более сложные механизмы зрения в соответствии с диалектическим законом “двойного отрицания” не подменяют более древние механизмы, не уничтожают их, а включают как составную часть, давая мозгу новые возможности. По-видимому, более древние слои сетчатки воспринимают только часть информации из изображений, формируемых оптической системой глаза. Кое-что об этом известно давно, так палочки не воспринимают информации о цвете, эту часть информации воспринимают колбочки. Во всех средах глаза свет испытывает двулучепреломление, в том числе и на двух слоях взаимно перпендикулярных нервных волокон, которые и сами по себе, по-видимому, воспринимают часть информации.

Известно, что нервные волокна представляют собой цилиндрические линзы, в плоскости изображения которых (чаще всего это фокальная плоскость вследствие их геометрии) свет фокусируется в линию. Второй слой таких же нервных волокон “прерывает” эту линию, формируя линейную матрицу точек. Таким образом, за оптически светосильным растром нервных волокон формируется матрица точек, которые и составляют, собственно изображение.

Эти “точки” далее анализируются специализированными клетками сетчатки. Повторюсь, но хочу еще раз подчеркнуть, что в своей многолетней работе по исследованию некоторых аспектов зрения, я использовал принцип историзма. Взаимно перпендикулярные нервные волокна как самый древний слой сетчатки задали направление формирования других механизмов зрения.

Известно, что Фурье образ светящейся точки в фокальной плоскости оптического элемента, ее отображающего, представляет собой матрицу точек во взаимно перпендикулярном распределении интенсивности света. На каждом волокне луч света испытывает двулучепреломление, на двух слоях волокон – это происходит дважды. Таким образом, формируются условия для интерференции двух пар «обыкновенного» и «необыкновенного» лучей в эквивалентной фокальной плоскости системы цилиндрических линз нервных волокон.

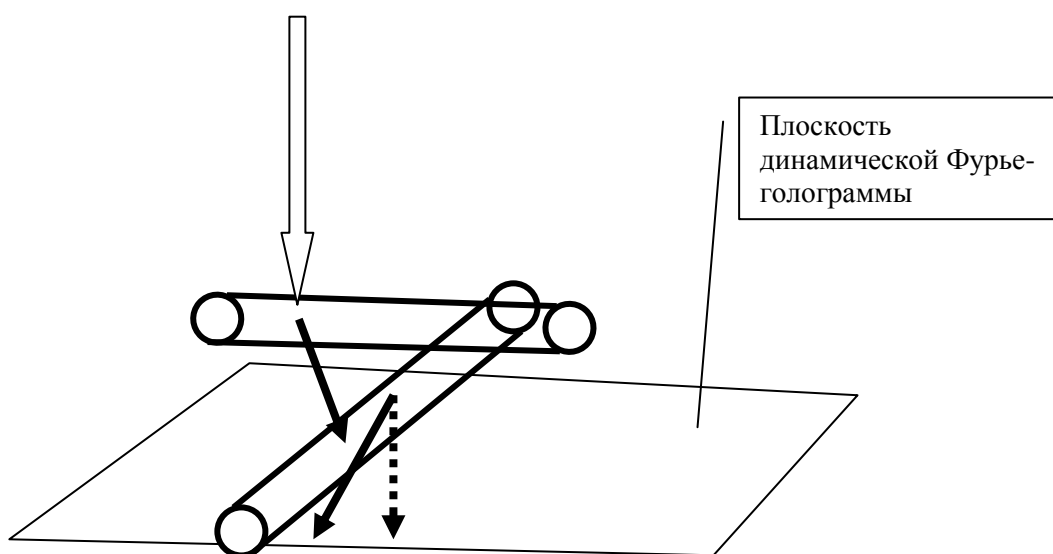


Рис.1. Двойной двулучепреломляющий цилиндрический растр

В этой плоскости формируется динамическая Фурье-голограмма. Воистину, только слепой не увидит в рассмотренной гипотезе практически идеальных условий для Фурье-анализа оптического поля, сформированного оптической системой переднего отдела глаза. Известно, что зрительные пигменты, имеющиеся в колбочках вполне пригодны и для трансляции оптической информации Фурье-голограммы в нервные импульсы. Логарифмическая чувствительность палочек и колбочек вполне «вписывается» в это предположение.

Кроме того, в мире сегодня бурно развивается так называемая «голографическая теория зрения», существуют работы, компьютерные программы, которые, опираясь на теоретические выводы Фурье-оптики, моделируют многие иллюзии зрения, которые признанные официальные теории объяснить не в состоянии. Конечно же, и «голографическая теория зрения» не может описать всех феноменов зрения, но она существенно дополняет интегральную модель зрения, накопленную человечеством. Все существующие

модели зрения сами по себе, по-видимому, отражают некие объективно существующие существенные свойства зрительного аппарата. Возможно, что некоторые из них входят в другие модели на правах частного случая, но чаще всего они объективно отражают именно лишь некоторые свойства зрения, отражающие реально реализованные природой в зрительном аппарате механизмы зрения.

Этот тезис подтверждает тот факт, что, например, при рассмотрении вопроса стереоскопического и глубинного зрения чаще всего исследователи имеют в виду чисто бинокулярный стереоэффект (ЧБС). Однако сегодня известны еще четыре механизма стереоскопического зрения, которые реально существуют, ими реально пользуются исполнители точных зрительных работ, например в фотограмметрическом и картографическом производстве, но приборная база для их исследования на сегодня отсутствует. Это не позволяет решать необходимые производственные проблемы комплексно, сдерживает развитие этих отраслей знаний о Земле.

До сих пор удовлетворительно не решены проблемы автоматизации многих производственных процессов в геодезии, картографии, фотограмметрии. Бурное развитие и применение вычислительной техники не привело к существенному повышению производительности труда в этих отраслях. Все дело в нерешенности многих накопившихся чисто научных проблем в области знаний о зрении живых существ и создания систем технического зрения. Именно тогда и можно будет многочисленные зрительные работы в топографо-геодезическом производстве переложить, так сказать, «на плечи» компьютеризированных систем.

Обратим внимание и не устройство переднего отдела глаза человека и некоторых высших животных. Как было отмечено выше, «фотографическая» аналогия устройства глаза не совсем корректна. Это относится и к устройству переднего его отдела. Представления Леонардо да Винчи о том, что хрусталик глаза именно та оптическая его «деталь», которая отвечает за «наводку на резкость», в научных кругах именуемой аккомодацией, оказалось неверными.

Хрусталик является не монолинзой. Он состоит из «долек» кривизна каждой управляется своей цилиарной мышцей. При относительно большой светосиле переднего отдела глаза так называемая «глубина резко изображаемого пространства» никак не соответствует реальной величине этого параметра для живого глаза. Каждая долька резко изображает свою область пространства. Кстати, Фурье-голографическая модель легко объясняет отсутствие в глазу вообще механизма «наводки на резкость».

Дело в том, что Фурье образ любой точки пространства предметов расположен в фокальной плоскости и вообще не требует аккомодации. Аккомодация, по-видимому, лишь обеспечивает условия резкого изображения всего предметного пространства, видимого человеком. Поэтому знания о механизмах «живого» зрения, остро необходимые разработчикам систем технического зрения, ждет в ближайшее время существенная модернизация, которая позволит на некоторое время снять противоречия теории и эксперимента, но и позволит, наконец, создать работоспособные системы

технического зрения, которые смогут не только решить накопившиеся прикладные задачи, но и дать мощный импульс фундаментальным исследованиям.

К фундаментальным проблемам, имеющим отношение и к оптико-электронному приборостроению, несомненно, относится и феномен двулучепреломление, а также тесно связанная с этим артефактом поляризация излучения вообще и оптического излучения в частности.

До сих пор двулучепреломление объяснялось, очень, впрочем, неубедительно, анизотропией некоторых сред. Существенное различие свойств, в частности оптических, в направлениях, отличающихся по своей пространственной ориентации столь незначительно (анизотропия) действительно малоубедительное объяснение этого феномена. Куда более логично было бы предположить существования двух «разных» оптических излучений, скажем с левой и правой динамической поляризацией, или с другими иными существенными оптическими свойствами, которые делают эти два оптических излучения одновременно и очень схожими по своим фундаментальным характеристикам (длина волны, энергия, плоскость поляризации) в то же время существенно различными в отношении анизотропии.

Три года назад увенчанная Нобелевской премией работа по т.н. «хиральности» дала подсказку в разгадке этого явления. Все вещества по своей стереохимической или точнее сказать и по стереофизической микроструктуре разделяются на право- и левовращающие плоскость поляризации оптического излучения. Тот факт, что левовращающие изомеры или их растворы, являются биологически активными (кроме сахара, биологически активен правовращающий изомер), подтверждает тезис о том, что анизотропия многолика, поэтому в ее основе должно лежать какое-то фундаментальное свойство, являющееся фундаментальным для всего мироздания. Из всей физики, только оптика пока еще не переживает острого методологического кризиса.

Поэтому именно физику-оптику, на мой взгляд, предстоит разрешить эту фундаментальную проблему. Созданное недавно Межвузовское профессиональное студенческое конструкторско-технологическое бюро «НИИГАиК» уже активно работает в этом направлении. Мы ожидаем, что привлечение к этой работе молодых талантливых ученых из разных научных школ Новосибирска не только вошьет столь необходимую для науки молодую кровь, но и существенно продвинет нас на бесконечном пути разгадывания загадок природы, позволит увереннее и эффективнее отвечать на вызовы времени.

© А.С. Борисек, А.В. Кальницкий, 2005

РАСЧЕТ ДИФРАКЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ НА 3D ОБЪЕКТАХ ПОСТОЯННОЙ ТОЛЩИНЫ ПРИ ОСВЕЩЕНИИ ПЛОСКИМИ И СФЕРИЧЕСКИМИ ВОЛНАМИ

Одной из актуальных задач современного приборостроения является автоматизация контроля геометрических размеров промышленных изделий. Для ее решения, как известно, используются различные методы Фурье оптики, такие как дифракционные, корреляционные и теневые, основанные на анализе и фильтрации спектров высоких и низких пространственных частот изображений таких объектов. Так как большинство изделий являются протяженными объектами, то необходимо учитывать влияние объемности этих изделий на их пространственные спектры. Поскольку теория Кирхгофа-Френеля позволяет проводить анализ дифракционных явлений только на объектах нулевой толщины, а существующие строгие и приближенные решения дифракционных задач чрезвычайно сложны для инженерных применений [1], возникает необходимость в создании конструктивной теории формирования изображений дифракционных картин Фраунгофера (спектров) протяженных 3D объектов.

В работе [2] была предложена конструктивная теория формирования в когерентном свете спектров 3D объектов постоянной толщины с плоскими абсолютно поглощающими внутренними поверхностями, которая, в отличие от известных, проста, физически наглядна и в то же время достаточно строга для инженерных применений. Она основана на модели эквивалентных диафрагм, согласно которой главный вклад в поле дают передняя и задняя грани объекта, причем влияние внутренней поверхности на дифракционное поле объекта полагается пренебрежимо малым и сводится либо к поглощению, либо к отражению волн, дифрагированных на передней грани. В результате проблема дифракции на объемных телах постоянной толщины сводится к анализу дифракционных явлений на плоских транспарантах, расположенных вдоль оптической оси, соответствующих передней и задней граням объекта, что позволяет применять для расчета стандартные методы Фурье оптики.

В [3] изучались дифракционные явления для случая освещения 3D тел плоскими волнами с нормальным падением. Однако, влияние конфигурации освещающего пучка для 3D тел (в отличие от двумерных) имеет принципиальное значение. Очевидно, что выбором конфигурации освещающего пучка можно подчеркивать (селектировать) или ослаблять влияние того или иного фрагмента объекта. Все это, однако, требует строгого математического рассмотрения. В настоящей работе представлены результаты расчетов дифракционных явлений на 3D объектах постоянной толщины при освещении их плоскими наклонными и сферическими волнами.

Дифракция света на 3D объектах при освещении их плоскими наклонными волнами. Рассмотрим дифракцию Фраунгофера на объектах с абсолютно поглощающей внутренней поверхностью при освещении их наклонными волнами под углом γ к оптической оси (рис. 1). При расчете воспользуемся ранее полученными результатами [2], в соответствии с которыми

спектр Фурье для 3D с абсолютно поглощающей внутренней поверхностью постоянной толщины в приближении малых углов наблюдения θ описывается следующим выражением (с учетом наклонного падения освещающей волны):

$$F_{FR}(\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \tilde{g}(x + \theta d) e^{-jk\theta x} e^{jk\gamma x} dx, \quad (1)$$

где $f(x)$ и $g(x)$ – граничные функции, описывающие амплитудные пропускания в передней и задней плоскостях объекта; θ – угол дифракции; γ – угол падения освещающей волны; $k=2\pi/\lambda$ – волновое число;

$$\tilde{g}(z) = (i\lambda d)^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} g(\xi) \exp\left[j \frac{k}{2d} (z - \xi)^2\right] d\xi - \text{френелевский образ функции } g(x).$$

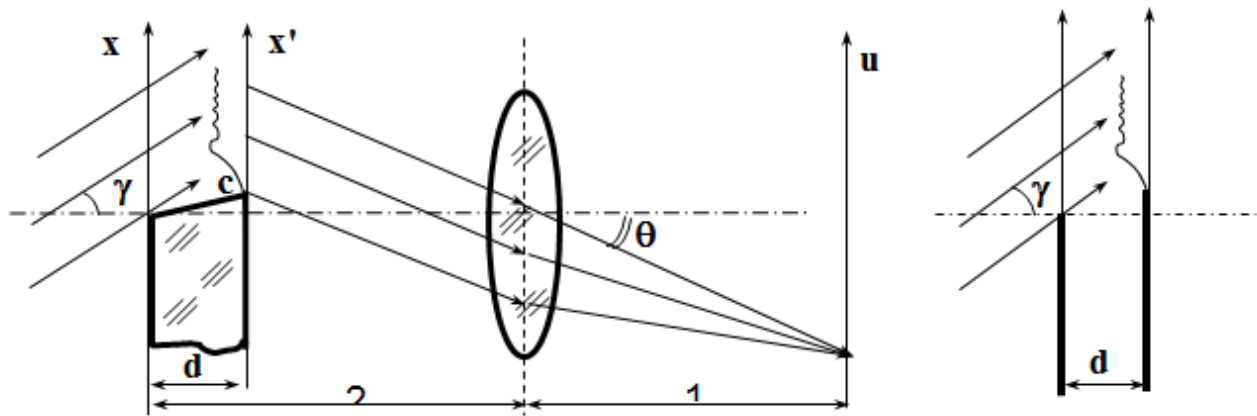


Рис. 1. Объемный асимметричный край при наклонном падении освещающей волны (а) и его модель эквивалентных диафрагм (б)

Для случая абсолютно поглощающего края используем уравнение (1) для вычисления пространственного спектра волны, дифрагированной на 3D крае протяженностью d и со скосом c (характеризующим параметр асимметрии). В этом случае граничные функции имеют следующий вид:

$$f(x) = Y(x); \quad g(x) = Y(x' - c), \quad (2)$$

где $Y(x)$ – ступенчатая функция Хевисайда.

В результате для пространственного спектра объекта можно получить следующее выражение:

$$F_1(\theta) = \pi \delta[k(\theta - \gamma)] + \frac{\tilde{Y}(\theta d - c)}{jk(\theta - \gamma)} + \frac{e^{-jk(\theta - \gamma)c} e^{j \frac{kd(\theta^2 - \gamma^2)}{2}}}{jk(\theta - \gamma)} \tilde{Y}(c - \gamma d) \quad (3)$$

Видно, что первый член описывает вклад в дифракционную картину от прошедшего пучка света, второй – дифракцию света на передней грани объекта с учетом виньетирования дифрагировавших волн задней гранью, а третий соответствует вторичной дифракции света на задней грани. Величина последнего определяется значением амплитуды поля $\tilde{Y}(c - \gamma d)$ – результата дифракции света на передней грани – в точке расположения края задней грани объекта. Фазовая составляющая учитывает положение края в поперечном (член

$e^{-jk(\theta-\gamma)c}$) и продольном (член $e^{\frac{jkd(\theta^2-\gamma^2)}{2}}$) направлениях. Естественно, что в зависимости от величины и знака параметра c , а также от угла падения освещающей волны γ , основной вклад в дифракционное поле объемного края дает его передняя или задняя грани.

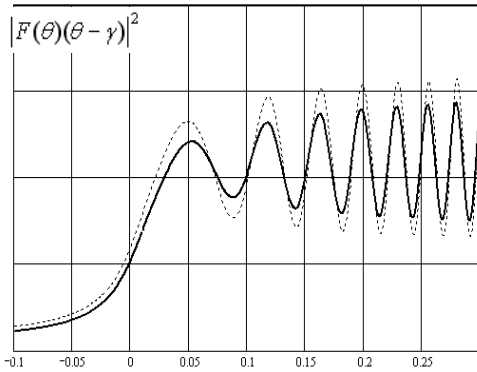


Рис. 2. Спектр мощности 3D края при его нормальном (пунктир) и наклонном ($\gamma=0.6^\circ$) освещении.

В качестве примера, иллюстрирующего влияние наклона освещения на вид спектра на рис. 2. приведена дифракционная картина симметричного абсолютно поглощающего края. Видно, что отклонение в положении дифракционных минимумов в зависимости от наклона освещающей волны действительно имеет место.

На основе полученных результатов можно решить и обратную задачу: по спектру мощности 3D края определить его протяженность.

Для этого воспользуемся предложенной в [3] аппроксимацией френелевского образа ступенчатой функции Хевисайда. Расчеты показывают, что положение минимумов спектра волны, дифрагированной на объекте типа симметричный край с абсолютно поглощающей внутренней поверхностью, описываются следующим выражением:

$$\theta_n = \sqrt{\frac{\lambda}{d}}(k_n + \Delta k_n) - l_n \gamma, \quad (4)$$

$$\text{где } k_n = \sqrt{2n-1}, \quad \Delta k_n = \frac{1}{2\sqrt{2}\alpha\pi(2n-1)}, \quad l_n = \frac{\alpha\sqrt{2n-1}+1}{2\sqrt{2}\pi(2n-1)}.$$

Восстанавливаемый параметр d находится из (5) по результатам измерения двух углов θ_n и θ_m соответствующих m -му и n -му порядкам ($n>m$) спектра:

$$d = (k_{n,m} - l_{n,m})^2 \frac{\lambda}{(\theta_n - \theta_m)^2}, \quad (5)$$

$$\text{где } k_{n,m} = k_n - k_m + \Delta k_n - \Delta k_m, \quad l_{n,m} = l_n - l_m.$$

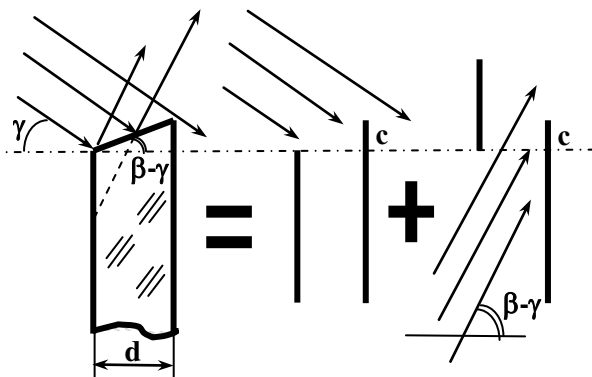


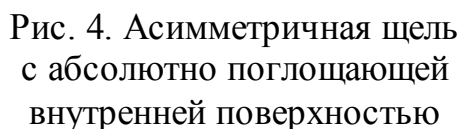
Рис. 3. Модель объемного асимметричного края с абсолютно отражающей внутренней поверхностью

Асимметричный абсолютно отражающий край. При вычислении спектра такого объекта, освещенного наклонной волной (рис. 3), воспользуемся моделью такого края, предложенной в [4]. Согласно ней, результирующее поле такого объекта представлено в виде суперпозиции двух волн: прошедшей, спектр которой равен спектру объекта с абсолютно

Расчеты показывают, что результирующий спектр выглядит следующим образом:

В (6) первые три члена описывают прошедшую волну, а остальные – отраженную. Следует отметить, что полученное выражение в пределе $c=0$, $\gamma=0$ совпадает с известным выражением [3] спектра волны, нормально падающей на симметричный абсолютно отражающий край.

3D абсолютно поглощающая асимметричная щель. Воспользуемся этим подходом и для вычисления спектра асимметричной щели с абсолютно поглощающими внутренними поверхностями (рис. 4).


$$\begin{aligned} f(x) &= \text{rect}\left(\frac{x}{2A}\right) = Y(x+A) - Y(x-A); \\ g(x) &= \text{rect}\left(\frac{x-b}{2B}\right) = Y(x+B-b) - Y(x-B-b), \end{aligned} \quad (7)$$

Вычисляя интеграл (1) с учетом вида граничных функций можно получить:

где $rect(z)$ - френелевский образ функции $rect(z)$.

79

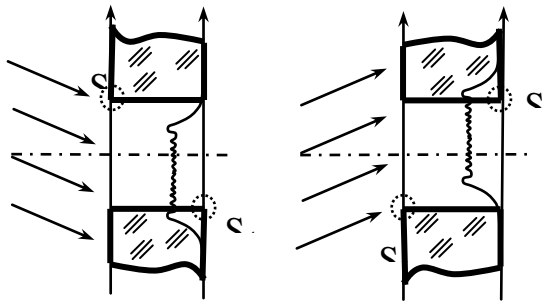


Рис. 5. Селекция элементов, дающих наибольший вклад в дифракционную картину вариацией наклона освещения

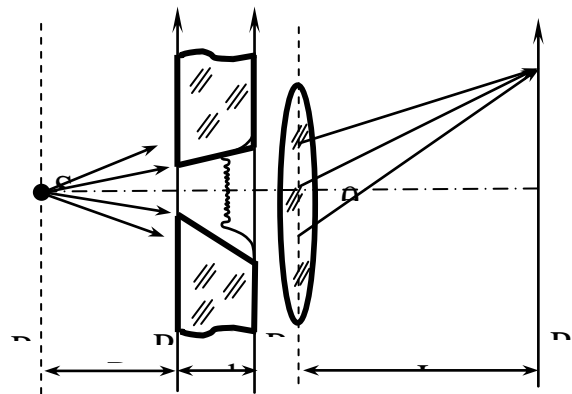


Рис. 6. Освещение асимметричной щели сферической волной

Дифракция света на 3D асимметричной абсолютно поглощающей щели при освещении ее сферической волной. В этом случае существенно, что дифракционная картина Фраунгофера формируется в плоскости P_1 , сопряженной плоскости P_0 , в которой находится источник освещения S (рис. 6).

Спектр 3D асимметричной абсолютно поглощающей щели при освещении ее сферической волной описывается следующей функцией:

$$F_4(\theta) = \frac{e^{jkm\theta A}}{jk\theta} r \tilde{e} ct \left(\frac{\theta dm - Am - b}{2B} \right) - \frac{e^{-jkm\theta A}}{jk\theta} r \tilde{e} ct \left(\frac{\theta dm + Am - b}{2B} \right) - \frac{e^{\frac{jkd m \theta^2}{2}} e^{-jk\theta b}}{jk\theta} \left[e^{-jk\theta B} r \tilde{e} ct \left(\frac{b+B}{2Am} \right) - e^{jk\theta B} r \tilde{e} ct \left(\frac{b-B}{2A} \right) \right], \quad (9)$$

$$\text{где } m = \frac{R+d}{R} = 1 + \frac{d}{R}.$$

Изменяя конфигурацию сферической волны, можно подчеркнуть или ослабить влияние передней или задней грани объекта. Случай согласованного

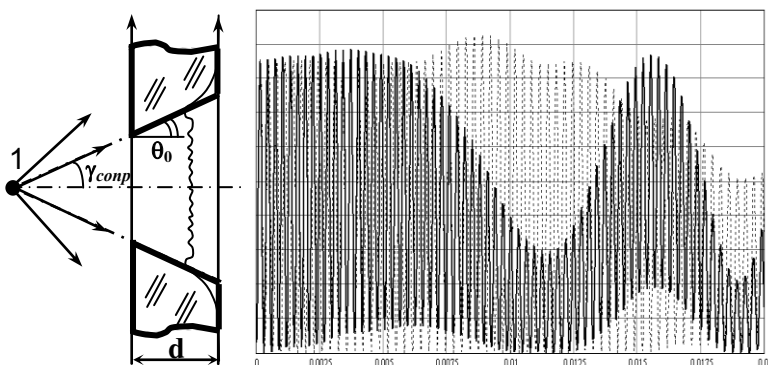


Рис. 7. Согласованное освещение щели с параметрами $A=1$ мм, $B=1.1$ мм, $d=5$ мм, $b=0$ сферической волной с радиусом кривизны $R=50$ мм. Пунктиром показан случай нормального освещения плоской волной

освещения объекта иллюстрирует рис. 7. При этом расположение источника таково, что он находится по отношению к краю щели под углом, равным углу скоса: т.е. $\gamma_{сопр} = \theta_0$. Из рис. 7. видно, что контраст картины в этом случае заметно увеличивается.

Полученные результаты будут использованы при изучении и фильтрации

картин Фраунгофера 3D объектов указанного типа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики*. М., Мир, 1964.
2. Yu.V. Chugui, B.E. Krivenkov. *Fraunhofer diffraction by volumetric bodies of constant thickness*, J. Opt. Soc. Am. A. 1989, v. 6. № 5, pp. 617-626.
3. Yu.V. Chugui. *Optical dimensional metrology for 3D objects of constant thickness*, Measurement, 2001, v. 30, № 1, pp. 19-31.
4. Yu.V. Chugui, V.A. Sokolov. *The imaging and high-frequency filtering of the 3D asymmetric edges*, Proc. 2-nd International Conference on Measurement, Smolenice Castle, Slovak Republic, Bratislava, 1999, pp. 161-165.

© К.А. Зебрева, Ю.В. Чугуй, 2005

ВЫСОКОТОЧНЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ УГЛОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР НА ПРОЗРАЧНЫХ НОСИТЕЛЯХ

В данном сообщении анализируются основные различия в процедурах контроля и аттестации углоизмерительных структур, нанесённых на прозрачный носитель, и готовых углоизмерительных приборов. Отмечается, что при контроле углоизмерительных структур, необходимо учитывать специфические источники погрешности: клиновидность прозрачного носителя, неплоскостность рабочих и нерабочих поверхностей носителя, несбалансированность ротора шпиндельного узла измерительной машины. Оценивается их вклад в общий бюджет погрешностей контроля и аттестации.

1. Введение

К настоящему времени уже в ряде стран мира созданы ультра прецизионные углоизмерительные системы, предназначенные для аттестации особо точных угловых датчиков и преобразователей углов [1 - 5]. И в это же время практически полностью отсутствуют публикации о создании аналогичных систем для контроля точности изготовления важнейших узлов фотоэлектрических угловых датчиков: растров, лимбов, шкал, кодовых дисков. В настоящем сообщении эти объекты контроля объединены как углоизмерительные структуры. Потребность в создании высокоточных измерительных систем для данных объектов остро испытывают производители различного углоизмерительного оборудования (теодолитов, тахеометров, гониометров и т.д.) [6, 7].

Аналогичную потребность испытывают производители линейных фотоэлектрических датчиков и преобразователей. И для них созданы соответствующие компараторы, обеспечивающие прецизионный контроль и готовых изделий, и подготовленных к сборке линейных шкал и растров [8, 9].

Процедура контроля углоизмерительных структур имеет ряд существенных особенностей по сравнению с контролем точности готовых угловых датчиков. Некоторые из проблем высокоточного автоматизированного контроля углоизмерительных структур, нанесённых на прозрачные носители, рассмотрены в данном сообщении.

2. Обзор методов построения автоматизированных систем для контроля точности углоизмерительных приборов

Большинство из созданных в настоящее время прецизионных систем для контроля точности углоизмерительных приборов реализует т.н. динамический метод измерений и имеет схожую схему построения. В них используется прецизионный вал (шпиндель), на котором соосно установлены прецизионный референтный датчик угла поворота и контролируемый прибор. В качестве контролируемого прибора может выступать готовый фотоэлектрический преобразователь, либо многогранная призма, либо оптический лимб, растр или многоразрядный кодовый диск. В качестве референтного датчика угла поворота используют фотоэлектрические преобразователи [3, 4], магнитные датчики [2]

или датчики на основе кольцевых лазеров [5]. Для измерений точности призм или шкал система должна иметь соответствующий узел считывания данных. Для контроля готовых датчиков в ней должен быть специальный столик и набор гибких прецизионных муфт.

Важнейшей задачей при создании ультра прецизионных углоизмерительных систем является обеспечение высокой точности референтных датчиков. Для этой цели широко используется процедура самокалибровки референтного датчика, чаще всего в сочетании с принципом многоточечного считывания данных [2]. Последний известен также как принцип путевого усреднения [10]. Его широкое использование основано на эффекте подавления важнейших гармоник Фурье-спектра погрешности шкалы референтного датчика при сложении выходных сигналов считывающих головок, расположенных заданным образом вдоль образующей кругового раstra. Эффект подавления зависит от числа дополнительно применяемых головок считывания данных. Так, добавление второй считывающей головки, размещённой диаметрально противоположно основной, обеспечивает подавление первой гармоники и всех остальных нечётных гармоник. Добавление третьей головки, размещённой со сдвигом на 90° относительно основной, обеспечивает подавление второй гармоники. Добавление четвёртой головки, размещаемой диаметрально противоположно третьей, позволит подавить вклад всех чётных гармоник, номера которых получаются путём умножения числа 2 на все остальные нечётные числа, т.е. (6, 10, 14 и т.д. гармоники). В [2] приводится пример использования 6 считывающих головок, расположенных на позициях 0° , $12,25^\circ$, $22,5^\circ$, 45° , 90° и 180° . Их использование позволяет подавить вклады 2^6 первых гармоник. Недостатком метода является быстрое нарастание сложности считывающего узла системы в зависимости от повышения требований по фильтрации гармоник. Несомненным достоинством метода является его быстроедействие. В тех случаях, когда требования быстрогодействия не являются определяющими, широко используют фазо-статистический метод [11]. Он известен также как метод Хэвелинка [12], или метод двух шкал [13]. Суть метода состоит в использовании n циклов измерений. После завершения измерений взаимного сдвига всех m штрихов контролируемой шкалы относительно соответствующих m штрихов референтной шкалы, контролируемая и референтная шкалы сдвигаются на угол $360^\circ/n$ относительно их первоначального положения и повторяют цикл измерений. Затем шкалы проворачивают ещё раз на угол $360^\circ/n$ и снова производят цикл измерений. Процедуру измерений повторяют n раз, пока одна шкала не провернётся относительно другой на 360° . Затем производят обработку матрицы из $m \times n$ результатов, состоящей в построчном усреднении результатов измерений. Если измерения были привязаны к началу отсчёта контролируемой шкалы, то результат обработки будет представлять собой новый файл данных, характеризующий погрешность каждого штриха контролируемой шкалы. Вклад погрешности референтной шкалы в этом файле данных будет снижен практически до нуля. Главное достоинство метода состоит в том, что он

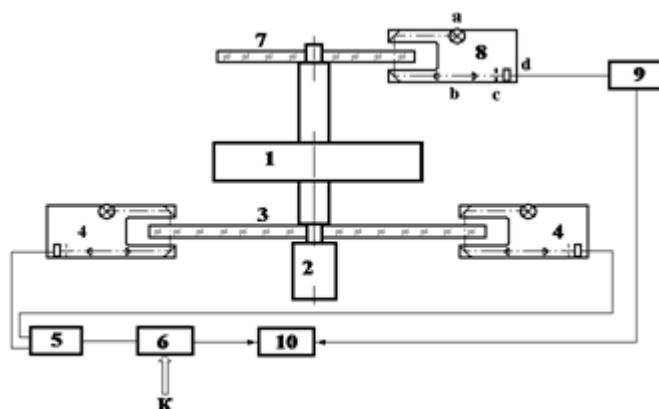
позволяет использовать не очень точные шкалы для выполнения высокоточных измерений. Главный недостаток метода – большое время измерений. Для того, чтобы реализовать потенциальные возможности данного метода, необходимо снижать случайные составляющие погрешности, сопутствующие процессу измерений. Среди прочих важное значение имеет погрешность квантования. Известна плохая сходимость данной погрешности в ходе процесса усреднения [14]. Поэтому её вклад снижают за счёт уменьшения абсолютной величины ошибки квантования. Поэтому в данных приложениях важно использовать высокоэффективные методы интерполяции, обеспечивающие высокую разрешающую способность референтного датчика.

Совместное использование указанных методов позволило аттестовать готовые угловые приборы с погрешностью $(0,02 - 0,03)''$ при разрешении до $0,001''$ [3, 4]. Однако, в случае контроля углоизмерительных структур достигнутые успехи существенно ниже.

3. Особенности процедуры контроля углоизмерительных структур, нанесённых на прозрачные носители

3.1. Структурная схема установки и алгоритм измерений

Особенности процедуры контроля углоизмерительных структур, нанесённых на прозрачные носители, рассмотрим на примере автоматизированной системы АС-700 [15, 16].



На рис. 1 приведена упрощённая структурная схема установки. В состав установки входят: аэростатический шпиндель 1, двигатель вращения 2, лимб 3, установленные на нижнем торце шпинделя, оптико-электронная система 4 считывания данных с эталонного лимба 3, электронный блок формирования опорной сетки частот 5, блок формирования виртуальной опорной шкалы 6, контролируемый лимб 7, устанавливаемый на верхнем торце шпинделя, оптическая система считывания данных 8 с контролируемого лимба 7 и электронный блок 9 формирования счётных импульсов из выходных сигналов системы 8. На рабочей поверхности лимба 3 нанесена метка начала оборота и регулярный растр, имеющий 108 000 штрихов. Оптико-электронная система 4

состоит из пяти считывающих головок, из которых четыре - предназначены для считывания данных с регулярного раstra, а одна – для считывания метки начала оборота. Измерение погрешности лимба 7 происходит при непрерывном вращении шпинделя 1.

Априорная информация о контролируемом лимбе вносится в блок 6, который синтезирует выходные импульсы, соответствующие импульсам идеальной шкалы (виртуальная шкала), используемые для сравнения с выходными сигналами блока 9. В управляющем компьютере 10 формируются 2 файла данных, несущих информацию о взаимном сдвиге чётных и нечётных импульсов на выходах блоков 6 и 9:

$$F1 = \{\Delta\Phi_1 \dots \Delta\Phi_{2i-1} \dots \Delta\Phi_{2n-1}\}, F2 = \{\Delta\Phi_2 \dots \Delta\Phi_{2i} \dots \Delta\Phi_{2n}\} \quad (1)$$

где $\Delta\Phi_i = \Delta\varphi_0 + \delta\varphi_1 + \delta\varphi_2$ - регистрируемые сдвиги, $\Delta\varphi_0$ - постоянный сдвиг, $\delta\varphi_1$ и $\delta\varphi_2$ – случайные сдвиги фаз фронтов импульсов, сформированных от штрихов референтной и контролируемой шкал, соответственно.

3.2. Систематическая погрешность референтного лимба АС-700

Так как условия считывания штрихов шкалы датчика угла АС-700 достаточно стабильны, то составляющую $\delta\varphi_1$ можно было бы считать систематической погрешностью установки АС-700. Учитывая состав узла считывания данных с референтного лимба (четыре считывающих головки данных и пятая головка формирования импульса начала оборота), можно было бы прогнозировать спектральный состав сигнала погрешности от референтной шкалы в виде следующей спектрограммы (рис. 2).

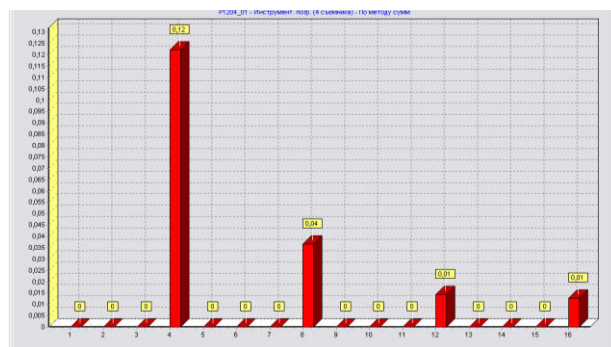


Рис. 2. Типовой спектр гармоник датчика с 4 головками считывания

На самом деле ситуация совсем иная. Так, используя фазо-статистический метод измерений с привязкой данных к началу оборота референтного лимба, были получены несколько файлов данных, характеризующих вклад референтного лимба 3 в результаты контроля точности изготовления лимбов для теодолитов (число штрихов 360, диаметр 90 мм) (рис. 3, а и в) и их спектральный состав (рис. 3, б и г).

На этих графиках обращают на себя внимание две особенности, первая – неповторяемость формы кривой, характеризующей вклад одного и того же лимба 3 в суммарную погрешность измерений, и вторая – её спектральный состав. В отличие от типовой спектрограммы на рис. 2 здесь можно наблюдать значительный вклад второй и третьей гармоник. Последнее особенно

неожиданно, т.к. референтный лимб имеет четыре считывающие головки, которые призваны давить действие второй и третьей гармоник. Природа возникающих искажений в графике погрешности будет обсуждена ниже.

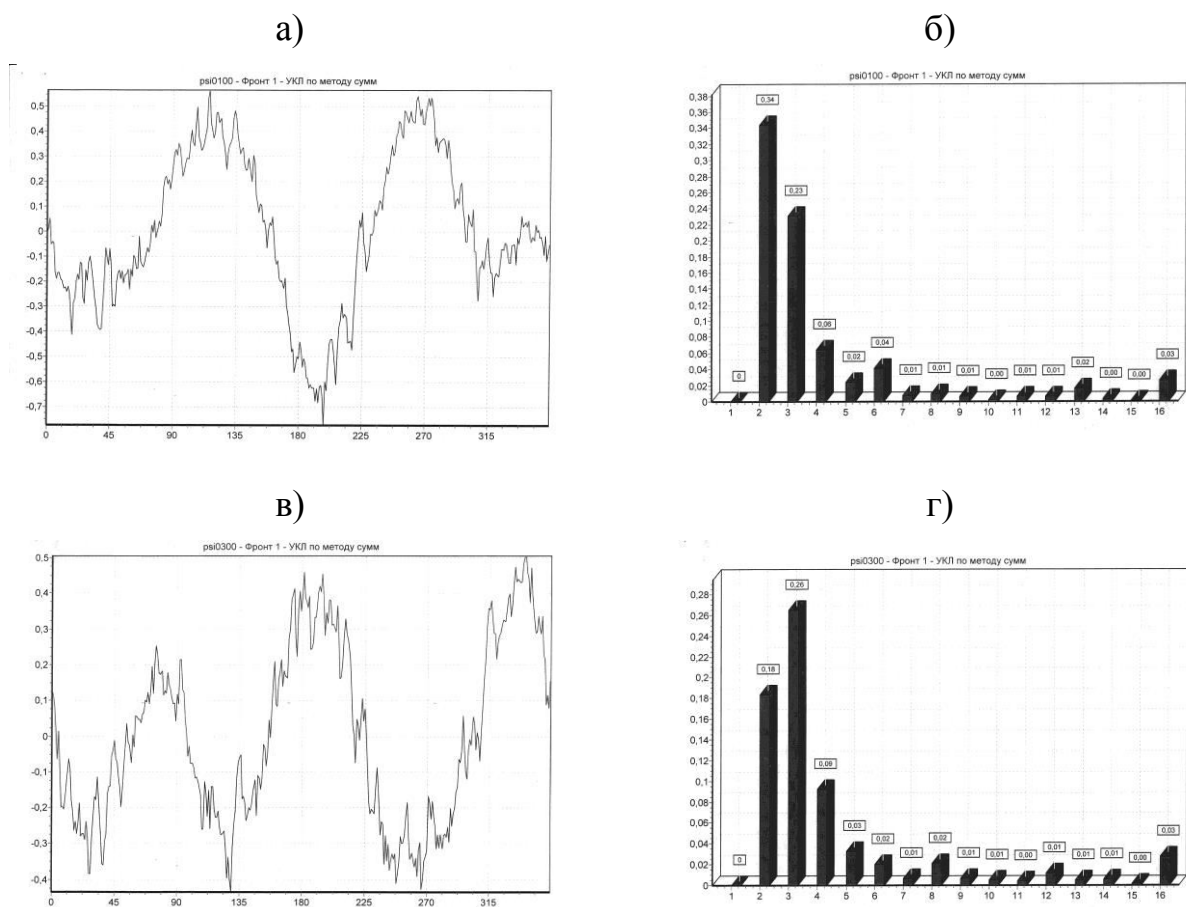


Рис. 3. Вклад от референтного лимба в суммарную погрешность (а, в);
Спектральный состав сигнала (б, г)

3.3. Случайные компоненты погрешности считывания данных с контролируемого лимба

В [15] и [16] исследованы основные источники погрешности контроля точности изготовления углоизмерительных структур, в том числе вносимые установкой из-за присутствия в измерениях прозрачного носителя – стеклянной подложки.

3.3.1. Погрешность эксцентриситета

Наиболее существенной случайной составляющей погрешности $\delta\varphi_2$ является компонента $\delta\varphi_{\text{экс}}$, обусловленная неточным совмещением центра шкалы с осью вращения шпинделя (известная как погрешность эксцентриситета). Эта составляющая погрешности меняется периодически, один раз за оборот шкалы. Как правило, эта составляющая не характеризует качество изготовления контролируемой шкалы, а определяется неточностью установки её на оправке шпинделя. Считается, что данный тип погрешности может быть устранён в конечном изделии при тщательной юстировке шкалы и

двух головок считывания. По этой причине в стандартной программе измерений погрешность эксцентриситета не принимают во внимание при оценке качества изготовления шкал и за счёт использования специального алгоритма обработки данных её программно устраняют из дальнейшего анализа.

3.3.2. Погрешность от неортогональности установки лимба

Неортогональность установки лимба относительно оси вращения приводит к торцевым биениям рабочей поверхности лимба и порождает два вида погрешностей. Первый - связан с изменением траектории движения считывающего луча. Амплитуду этой составляющей можно оценить из следующего выражения:

$$\Delta R = \frac{(\Delta H)^2}{R}, \quad (2)$$

где ΔH - ход поверхности заготовки в торцевом направлении при вращении оправки шпинделя вследствие неточной установки заготовки. Тангенциальная проекция данного вектора даст составляющую угловой погрешности, частота которой вдвое выше частоты вращения контролируемого лимба (вторая гармоника погрешности). Для основной продукции, контролируемой на установке, $R \cong 45$ мм и $\Delta H \leq 10$ мкм эта составляющая достигает $0,4''$.

Вторая составляющая связана с проходом считывающего луча через стеклянную основу лимба. Примем, что подложка лимба, толщиной d , плоскопараллельная. В этом случае падающий луч выходит из стекла смещённым на ΔR .

$$\Delta R = \frac{d_{nl}}{R \cdot n_{cm}} \cdot \Delta H \quad (3)$$

При вращении пластины прошедший луч описывает круг радиуса ΔR вокруг своего неискажённого положения. Тангенциальная проекция вращающегося вектора даёт составляющую погрешности, синхронную с частотой вращения.

При $d = 5$ мм и $\Delta H = 10$ мкм ΔR достигает $0,7$ мкм, что обуславливает угловую погрешность около $3,2''$.

3.3.3. Влияние клиновидности подложек на погрешность измерений

Согласно чертежам при изготовлении подложек лимбов допускается клиновидность до $30'$. Клиновидность подложки приводит к изменению ориентации луча на выходе. При вращении подложки луч на выходе из неё выписывает конус, основание которого в плоскости передней линзы считывающего объектива b блока 8, (рис. 1) представляет круг, диаметр которого пропорционален углу клина β и расстоянию от подложки до объектива фотоприёмника H :

$$\Delta r = H \cdot \operatorname{tg} \beta \quad (4)$$

Тангенциальная проекция вращающегося вектора даёт составляющую погрешности, синхронную с частотой вращения. При $H = 20$ мм Δr может достигать 180 мкм, что на радиусах 45 мм соответствует угловой погрешности порядка $(10 - 12)'$.

3.3.4. Влияние неплоскостности рабочей поверхности подложки

В общем случае, неплоскостность рабочей поверхности подложки при вращении её вместе со шпинделем на одном обороте даёт несколько изменений направления нормали к поверхности подложки. В каждой точке поверхности подложки неплоскостность проявляет себя как локальная клиновидность, вклад которой в общую погрешность измерения можно оценить по формуле, аналогичной (4), в которой параметр клиновидности β представлен углом между нормалью к поверхности и вертикалью. Для случая, когда угол β меняет свой знак два раза за оборот, максимальное искажение результатов может достигать:

$$\Delta r_2 = \frac{H}{R} \Delta h \quad (5)$$

где $\Delta h = \Delta N \cdot \lambda/2$, $\lambda = 0,55$ мкм. Удельный вклад анализируемой компоненты составляет - 0,11 мкм/полосу или 0,5"/полосу при вдвое большей частоте, чем частота вращения (вторая гармоника погрешности).

3.3.5. Влияние неплоскостности нерабочей поверхности подложки

Нерабочая поверхность лимба также искажает ход зондирующего луча. Выражение для смещения луча в плоскости передней линзы считывающего объектива для простейшего случая будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta r = - H/R \cdot n_{cm} \Delta h \quad (6)$$

где n_{cm} – показатель преломления стекла.

3.3.6. Влияние локальных искажений поверхности

Вклад локальной неплоскостности ΔN также определяется параметром клиновидности β , абсолютное значение которого обратно пропорционально размеру локального искажения L . Смещение луча от локальной неплоскостности можно представить в виде:

$$\Delta r = 2H/L \cdot \Delta h = H/L \cdot \Delta n \cdot \lambda. \quad (7)$$

Локальные искажения вносят более высокочастотные составляющие в спектре помех, чем искажения глобальные.

4. Повышение точности контроля углоизмерительных структур, нанесённых на прозрачный носитель

4.1. Инвариантность формирования данных к неидеальностям прозрачных носителей

В [15, 16] рассмотрен метод статистического разделения составляющих погрешности формирования углоизмерительных структур по их принадлежности к технологической и измерительной системам. Метод позволил с достаточно высокой достоверностью определить вклады каждой системы в результаты измерений. Но метод достаточно дорогой и чрезвычайно времяёмкий. При создании обеспечить технологических установок необходимо прямое подавление обнаруженных источников погрешностей, т.е. обеспечить процесс измерений, инвариантный к неидеальностям прозрачных носителей.

Видимо следует признать, что использование методов измерений на «проход» в данном приложении является менее предпочтительным, чем на отражение, т.к. во втором случае действует меньше дестабилизирующих

факторов, чем в первом. Но в обоих случаях целесообразно воспользоваться наработками в области создания измерительной аппаратуры, созданной для работы с большим ходом излучения в атмосфере. Здесь нередко используют приём повторного прохождения излучения через среду [17]. По аналогии с [17] в [18] нами предложено использовать адаптивное зеркало (или возвращатели излучения типа «кошачий глаз» или триппель-призмы) для повторного прохождения зондирующего луча через прозрачный носитель (рис. 4).

В этом случае процесс формирования сигналов о прохождении краёв штрихов шкалы не будет возмущаться паразитным влиянием материала подложки лимба.

4.2. Повышение точности шпиндельного узла измерительной системы

Тот факт, что в экспериментах, обсуждаемых в п. 3.2, были зарегистрированы вторая и третьи гармоники сигнала погрешности референтного лимба говорит о том, что контролируемый лимб совершает движение более сложное, чем простое вращение. И так как эти искажения оказались приписанными референтному лимбу, то это указывает на то, что эти движения синфазны с движением референтного лимба. Можно также утверждать, что искажения спектра связаны с усложнённой траекторией движения зондирующего луча по поверхности тестируемой структуры. И то, что регистрируемые искажения формы кривой погрешности референтного лимба весьма индивидуальны для каждого тестируемого лимба, указывает на то, что большое влияние имеют случайные параметры самого носителя. Например, такие как собственная масса стеклянной пластины, положение раstra относительно физических границ пластины, на которой он нанесён, или положение центра масс пластины. При высоко расположенном центре масс ротора установки АС-700 и нестрогой вертикальности оси вращения ротора эти факторы приводят к изменению степени разбалансировки шпинделя. В свою очередь, это ведёт к появлению паразитного движения центра вращения ротора, параметры которого зависят от многих факторов. Для тестируемых структур смещение центра вращения на 0,2 мкм приводит к появлению погрешности порядка 1". Следовательно, для получения воспроизводимости результатов контроля на уровне 0,01" необходимо обеспечить стабильность положения оси вращения ротора на уровне 0,002 мкм. И для обеспечения этого требования необходимо создать соответствующие технические средства.

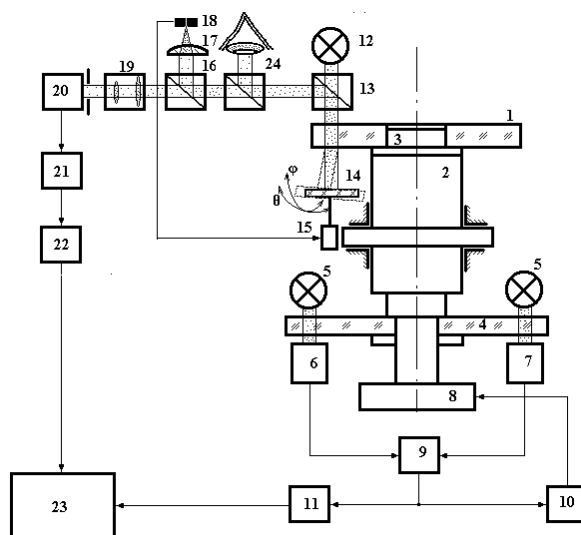


Рис. 4. Компенсация влияния материала контролируемого лимба с помощью адаптивного зеркала:

1 – контролируемый лимб, 2 – шпиндель, 4 - референтный лимб, , 14 –адаптивное зеркало, 15 – двухкоординатный привод зеркала, ...

5. Заключение

Проанализированы основные дестабилизирующие факторы, сопутствующие процессу контроля точности изготовления растров, лимбов, шкал на прозрачных носителях, которые ограничивают точность известных измерительных систем на более низком уровне по сравнению с системами, созданными для аттестации готовых угловых преобразователей или углоизмерительных приборов. Показано, что многие из отмеченных факторов вносят искажения, достигающие единиц угловых секунд. Предложены технические решения, позволяющие повысить точность контроля углоизмерительных структур. Чтобы поднять точность систем до уровня систем, разработанных для контроля готовых приборов, необходимо коренным образом изменить техническое вооружение для вспомогательных операций, например, таких как динамическая балансировка ротора шпиндельного узла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. R. Probst, A. Just. Recent developments in angle encoder calibration at the PTB. Proceeding of the PTB-Seminar, Braunschweig, Germany, 2003.
2. T. Masuda, M. Kajitani. An automatic calibration system for angular encoders. Precision Engineering, 1989, v. 11, No 2, p. 95.
3. T. Watanabe, H. Fujimoto, K. Nakayama, T. Masuda, M. Kajitani. Automatic high-precision calibration system for angle encoder. Proc. SPIE, Vol. 4401, 2001, p. 267.
4. T. Kojoima, Y. Kikuchi, S. Seki, T. Masuda, H. Wakiwaka. Development of High-precise Angle Calibrating Apparatus and High-precise Angular Sensor. Proc. 1-st Intern. Conference on Positioning Technology. Hamamatsu, Japan, 2004. p. 417.

5. М.Н. Бурнашов, Д.П. Лукьянов, П.А. Павлов, Ю.В. Филатов. Развитие методов и средств лазерной динамической гониометрии. Квантовая электроника, т. 30, № 2, 2000, с. 141.
6. Б.Ц. Яхилевич, Ю.Г. Микуцкий, Б.Г. Лобанов, В.Ф. Безобразов, К.Н. Назарбаев, Б.А. Казаков. Устройство для контроля дорожек лимбов угломерных приборов. Авторское свидетельство СССР № 1049736, 1981.
7. Б.Ц. Яхилевич, А.С. Поляк. Способ определения осреднённой погрешности прозрачного лимба углоизмерительного прибора. Авторское свидетельство СССР № 1659702, 1988.
8. В.М. Ведерников, А.И. Ерышов, Ю.В.П. Кирьянов, С.А. Кокарев, В.М. Тараканов. Лазерные измерительные системы для аттестации растровых преобразователей линейных перемещений. Датчики и системы. № 3, 1999 г., с. 24- 27.
9. M. Savabe, F. Maeda, Y. Yamaya, T. Simomura, Y. Saruki, T. Kubo, H. Sakai, S. Hoyagi. A new vacuum interferometric comparator for calibrating the fine linear encoders and scales. Precision Engineering, 2004, v. 28, No 3, p. 320.
10. В.Ф. Ионак. Приборы кинематического контроля. М. «Машиностроение», 1981, 129 стр.
11. V. Portman, B. Peschansky. Phase-statistical method and device for high precise and high-efficiency angular measurements. Precision Engineering, 2001, v. 25, p. 309.
12. Е.С. Парняков. Методы и средства автоматизированного контроля круговых мер. ЦНИИТЭ, 1989.
13. В.Я. Эйдинов. Измерение углов в машиностроении. М., Стандарт ГИЗ, 1963, 414 с.
14. В.М. Ефимов. Ошибки квантования по уровню при цифровых измерениях. Автометрия, № 6, 1967.
15. V.P. Kiryanov, A.V. Kiryanov, S.A. Kokarev, V.G. Nikitin, S.A. Bartik, S.E. Frizin, D.Yu. Kruchinin, O.B. Yakovlev. Development of technique for determination of metrological parameters of technological system CLWS-300/C for synthesis of high precision angular measuring structures. Proc. 10th IMEKO TC7 International Symposium on Advances of Measurement Science, S.-Petersburg, 2004, v. 2, p. 316.
16. V.P. Kiryanov, A.V. Kiryanov, S.A. Kokarev, V.G. Nikitin, V.M. Vedernikov. Determination of metrological performance technology for forming the precision angular measuring structures using laser image generators with circular scanning. Proc. 2-nd International Symposium Mechanical Measurements, Beijing, China, p. 129.
17. А.В. Алексеев, М.В. Кабанов, И.Ф. Куштин. Оптическая рефракция в земной атмосфере. Новосибирск, 1982, 180 с.
18. В.П. Кирьянов, А.В. Кирьянов. Способ измерения точности изготовления углоизмерительных структур, нанесённых на прозрачный носитель. Патент РФ на изобретение № 2242715, 2003.

© В.П. Кирьянов, 2005

СИСТЕМА СЛИЯНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ВИДИМОЙ – БЛИЖНЕЙ ИК И ДАЛЬНОЙ ИК ОБЛАСТИ БЕЗ ПАРАЛЛАКСА

В статье рассматриваются схема с общей апертурой и с общим рефракторным объективом. В отношении электронной составляющей слияния изображений был использован чип фирмы «Альтера». Представлены основные требования, предъявляемые к разработке двуспектральных систем.

Камеры, чувствительные в видимой и ближней ИК области обладают высоким разрешением, способны обнаруживать прицельные ИК сигналы, но не видят в тумане, через листву, полную темноту, пыль, камуфляж. Длинноволновые камеры имеют низкое разрешение и не способны обнаруживать прицельные ИК сигналы. Возникает необходимость слияния изображения в трех областях спектра для взаимной компенсации недостатков. Для того чтобы цель была видна без параллакса, система должна иметь общий входной зрачок. Для приведения формата тепловизионного изображения к формату визуального, применяется масштабирование размера изображения, настройка уровня выходного сигнала в реальном времени, чем достигается попиксельное наложение изображений.

Для разработки систем слияния изображений, которую можно установить на шлем, держать в руках или установить на ракету должны быть решены следующие задачи:

- Хотя разрешение неохлаждаемых фотоприемных (ФП) матриц довольно высокое, чувствительность их очень низка, по сравнению с охлаждаемыми, а значит дальность действия невелика, что является критическим недостатком для применения в ракетных головках;

- Треть или четверть стоимости всей системы приходится на германиевую оптику, значит необходимо искать заменители германия;

- Современные неохлаждаемые матрицы используют термоэлектрическое охлаждение, хотя оно потребляет не много энергии, но увеличивает размер и вес;

- Для обработки сигнала современные матрицы используют традиционные платы, громоздкие и дорогостоящие. Эти платы должны быть заменены простыми;

- Система должна иметь общий входной зрачок для устранения параллакса;

- Изображение от прибора с зарядовой связью (CCD) и от тепловизионного прибора (ТВП) имеют разный формат и уровень сигнала, для их попиксельного наложения необходимо разработать электронику и программы, приводящие оба изображения к одному масштабу, числу пикселей и уровню сигнала;

- Для слияния изображений может использоваться оптический и электронный методы. Первый метод не ухудшает разрешение CCD

изображения, но его трудно совместить с ТВП изображением. Вторым легко выполнить совмещение изображений, но разрешение CCD изображение ухудшится. Необходимо искать новые решения;

- В комбинированной двуспектральной системе необходимо обеспечить оцифровку изображения, сигнальный интерфейс, одновременное отображение и обработку двух изображений в видимом - ближнем ИК и дальнем ИК, также электронное масштабирование;

- Для уменьшения общей стоимости двуспектральной системы необходимо использовать ТВП приемник на неохлаждаемой матрице 240x320 с размером чувствительных элементов не более 50 мкм и разработать систему слияния изображений;

- Чтобы разместить двуспектральную систему на ружье, необходимо уменьшить массу как ТВП, так ночного прицелов.

Двуспектральная система с общим рефракторным объективом изображена на рис. 1. Объектив сделан из ZnSe или ZnS (имеет хорошее пропускание на 0,6-12 мкм) и используется как общий входной зрачок для электронно-оптического и ТВП изображений.

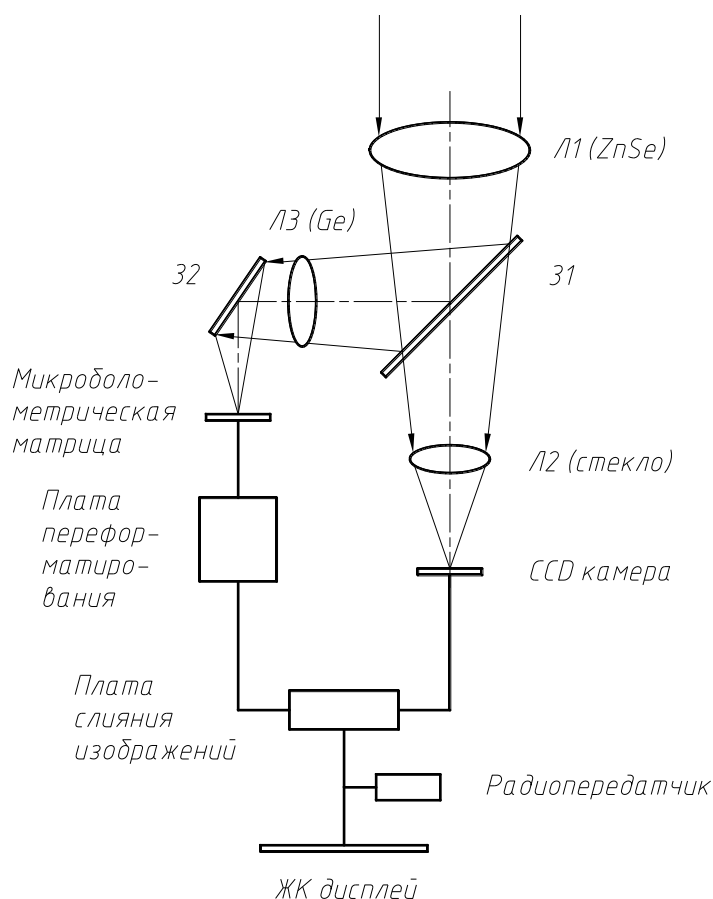


Рис. 1. Двуспектральная система с общим рефракторным объективом

В качестве разделительного пучка используется полупрозрачное зеркало 31, которое пропускает излучение на 0,6-1,0 мкм, но отражает на 8-12 мкм. Электронно-оптическое изображение, формируется далее линзой Л2, сделанной из стекла на поверхность приемника, в качестве которого может использоваться

высокочувствительная ССД камера. Линза Л2 совместно с Л1 компенсирует aberrации на 0,6-1,0 мкм и дает изображение высокого разрешения. Оцифрованное изображение поступает далее на плату слияния изображений.

Отраженное от зеркал З1, З2 длинноволновое ИК изображение попадает на поверхность на фотоприемного устройства (ФПУ), пройдя через линзу Л3, сделанную из германия или ИК стекла. Линза Л3 совместно с Л1 компенсирует aberrации на 8-12 мкм. Перед тем, как послать данные с ФПУ на плату слияния изображений необходимо предварительно обработать ИК изображение в платах переформатирования изображения для приведения его к формату ССД изображения. В результате переформатирования изображение увеличивается/сжимается, вставляются данные между пикселями и т.д. После прохождения через плату слияния изображений сигнал может направляться на ЖК экран, либо одновременно в одном полном кадре, либо попеременно кадр за кадром. Цифровые данные после слияния могут дальше использоваться для обработки изображения, автоматического распознавания.

В данной схеме решается большинство из вышеперечисленных задач, в частности, используется заменитель германия, общий входной зрачок устраняет погрешность параллакса, работа происходит в видимой – ближней ИК и дальней ИК области, вследствие чего, происходит взаимная компенсация недостатков работы в этих областях спектра.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Electro-Optical Systems. – 1999. – October.

© И.Н. Банчило, 2005

УДК 681.7

М.П. Егоренко

СГГА, Новосибирск

РАЗРАБОТКА МНОГОСПЕКТРАЛЬНОГО ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВОГО ОБЪЕКТИВА

В последние годы появилась потребность в оптических системах, работающих в нескольких диапазонах спектра одновременно, которые значительно расширяют эксплуатационные свойства изделия и позволяют собирать информацию об объекте в разных диапазонах спектра.

В настоящее время стоят задачи по повышению информативности оптикоэлектронных приборов (ОЭП). Одним из возможных решений является обнаружение объекта комбинированными ОЭП.

Сегодня для задач обнаружения и опознавания объекта в разных диапазонах спектра используются оптические системы, выполненные из различных оптических материалов [1]. Такие конструкции оптических систем получаются очень громоздкие, особенно при наблюдении удаленных объектов. В настоящее время мы занимаемся разработкой устройства, работающего в диапазоне спектра от 0.5 до 12 мкм, выполненного из оптического материала ZnSe.

Научный интерес заключается в попытке коррекции хроматизма в трех диапазонах спектра. Практический интерес к разработке таких систем

заключается в том, что этот прибор предназначен для замены трех оптических систем одним многоспектральным устройством, выполненного из материала прозрачного в диапазоне спектра от 0.5 до 12 мкм. Это позволяет уменьшить весогабаритные характеристики и упростить юстировку, так как не требуется совмещения трех визирных каналов и применения, специальных контрольно юстировочных приборов для тепловизионного диапазона спектра.

Решения этой задачи и посвящена данная статья.

На текущем этапе занимаемся расчетом хроматизма положения, для этого этапа были использованы формулы хроматической суммы. Разворачиваем ее по компонентам и расписываем для нашего конкретного случая. Система работает с бесконечного на конечное расстояние, и поэтому необходимо ввести ряд ограничений:

$\alpha_1=0, \alpha_5=1, h_1=1$ -это основные ограничения;

$n_1=1, n_2=1, n_3=-1, n_4=1, n_5=1$ -это показатели преломления среды;

ещё есть показатели преломления материала, считаем, что линзы из одного материала, поскольку материалов работающих в ИК диапазоне очень мало. Используется свойство зеркала Манжена, которое имеет отрицательное значение хроматической аберрации, поэтому зеркало Манжена, согласно из [2] может скомпенсировать треть хроматической аберрации положительной линзы.

Компенсируется хроматизм положения – первая хроматическая сумма (S_{xpI}).

$$dS = \sum_{i=1}^4 h_i C_i = 0 \text{ - для каждого из диапазонов спектра} \quad (1)$$

C - хроматический параметр;

h – высота апертурного луча.

$$S_1 \lambda_1 = h_{11} C_{11} + h_{12} C_{12} + h_{13} C_{13} + h_{14} C_{14} = 0$$

$$S_1 \lambda_2 = h_{21} C_{21} + h_{22} C_{22} + h_{23} C_{23} + h_{24} C_{24} = 0$$

$$S_1 \lambda_3 = h_{31} C_{31} + h_{32} C_{32} + h_{33} C_{33} + h_{34} C_{34} = 0$$

Так как $\alpha_1=0$, то $h_{11} C_{11}=0$

Так как $C_3=0$ (то есть зеркало не имеет хроматизма), тогда $h_{13} C_{13}=0$

$$S_1 \lambda_1 = h_{12} C_{12} + h_{14} C_{14} = 0$$

$$S_1 \lambda_2 = h_{22} C_{22} + h_{24} C_{24} = 0$$

$$S_1 \lambda_3 = h_{32} C_{32} + h_{34} C_{34} = 0$$

Введем ограничение [7]:

$$C = \frac{\alpha}{\mu} \sigma \frac{\Delta n}{n}; \mu = \frac{1}{n}; \alpha = \alpha_3 - \alpha_2, \text{ отсюда}$$

$$C_{12} = (\alpha_3 - \alpha_2) \frac{\Delta n}{\mu n} \sigma; \alpha_3 = \alpha_2 + h_{12} \varphi_2; \alpha_3 - \alpha_2 = h_{12} \varphi_2$$

$$C_{14} = (\alpha_4 - \alpha_2) \frac{\Delta n}{\mu n} \sigma; \alpha_5 = \alpha_4 + h_{14} \varphi_4; \alpha_5 - \alpha_4 = h_{14} \varphi_4$$

$$S_{1\lambda 1} = h_{12} (\alpha_3 - \alpha_2) \sigma \frac{\Delta n}{\mu n} + h_{14} (\alpha_5 - \alpha_4) \sigma \frac{\Delta n}{\mu n} \text{ и т. д.}$$

$$\sigma\left(-\frac{\Delta n}{\mu n}\right) S_{I\lambda 1} = h_{12}\varphi_{12}h_{12} + h_{14}\varphi_{14}h_{14} \text{ и т. д.}$$

$$\sigma\left(-\frac{\Delta n}{\mu n}\right) = const$$

Так как левая часть уравнения не равна нулю, то, приравняв к нулю правую часть уравнения, получим:

$$(h_{12})^2 \varphi_{12} = -(h_{14})^2 \varphi_{14}; \text{ и т. д.}$$

отсюда:

$$\frac{\varphi_{12}}{\varphi_{14}} = -\frac{(h_{12})^2}{(h_{14})^2}, \quad \frac{\varphi_{22}}{\varphi_{24}} = -\frac{(h_{24})^2}{(h_{22})^2}, \quad \frac{\varphi_{32}}{\varphi_{34}} = -\frac{(h_{34})^2}{(h_{32})^2}.$$

В результате анализа этих формул на данной стадии расчета получили, что хроматизм положения выбранной системы не зависит от материала, а зависит от оптических сил второго и четвертого компонентов. Таким образом, нам было необходимо обеспечить коррекцию хроматизма положения в трех спектральных диапазонах. Для этого была использована формула (1). Используя ограничения, была получена система из трех уравнений для трех диапазонов спектра, которые показывают зависимость для отношений оптических сил.

В отличие от системы с несколькими оптическими материалами для дальнейшего анализа оптических сил, используется уравнение (5) [3].

$$\varphi_2 = 2\varphi_4 + \frac{n_1}{n_2} \varphi_{зерк.}, \quad (5)$$

где $n_1=1$ (воздух).

Применив формулу одиночной линзы в воздухе, найдем φ_4 .

$$\varphi_4 = (n-1)\left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right) + \frac{(n-1)^2 d_m}{nr_3 r_4}, \quad (6)$$

где d_m - толщина мениска.

$$\frac{r_3 - r_4}{d_m} = 1 - \frac{1}{n^2} \quad [4] \quad (7)$$

Выражаем отсюда n , для того чтобы подставить в формулу (6):

$$n = \sqrt{\frac{d_m}{r_4 - r_3 + d_m}}, \quad (8)$$

$$\varphi_{зерк} = \frac{1}{2r_2} \quad (9)$$

Подставив в выражение (5) формулы (6, 7, 8, 9), получаем:

$$\varphi_2 = 2 \left[\left(\sqrt{\frac{d_m}{r_4 - r_3 + d_m}} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) + \frac{\left(\sqrt{\frac{d_m}{r_4 - r_3 + d_m}} - 1 \right)^2 d_m}{\sqrt{\frac{d_m}{r_4 - r_3 + d_m}} r_3 r_4} \right] +$$

$$+ \frac{1}{\sqrt{\frac{d_m}{r_4 - r_3 + d_m}}} \frac{1}{2r_2}.$$

Проведя ряд преобразований, получим:

$$\varphi_2 = 2 \left[\left(\sqrt{\frac{d_m}{r_4 - r_3 + d_m}} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) + \sqrt{\frac{d_m^3}{r_4 - r_3 + d_m}} \frac{1}{r_3 r_4} - \frac{2d_m}{r_3 r_4} + \sqrt{d_m(r_4 - r_3 + d_m)} \right] +$$

$$+ \sqrt{\frac{(r_4 - r_3 + d_m)}{d_m}} \frac{1}{2r_2} \quad (10)$$

Далее используем формулы производных тангенсов для того, чтобы определить φ_Σ для нашей системы.

$$\alpha_1 = 0; \quad \alpha_2 = \frac{n_1}{n_2} \alpha_1 + \frac{h_1}{h_2} \varphi_1 = \frac{1}{n_2} h_1 \varphi_1; \quad \alpha_3 = \frac{n_2}{n_3} \alpha_2 + \frac{h_2}{h_3} \varphi_2 = \frac{1}{n_3} (h_1 \varphi_1 + h_2 \varphi_2);$$

$$\varphi_\Sigma = \frac{n_3 \alpha_3}{h_1}; \quad \varphi_\Sigma = \frac{1}{h_1} (h_1 \varphi_1 + h_2 \varphi_2); \quad (11)$$

$$h_2 = h_1 - d_1 \alpha_2 = h_1 - d_1 \frac{1}{n_2} h_1 \varphi_1 = h_1 \left(1 - \frac{d_1 \varphi_1}{n_2} \right);$$

Подставив h_2 в формулу 13 получаем выражение для φ_Σ .

$$\varphi_\Sigma = \frac{1}{h_1} \left(h_1 \varphi_1 + h_1 \cdot \left(1 - \frac{d_1 \varphi_1}{n_2} \right) \cdot \varphi_2 \right) = \varphi_1 + \varphi_2 - \frac{d_1 \varphi_1 \varphi_2}{n_2};$$

Таким образом, φ_Σ имеет вид:

$$\varphi_\Sigma = \varphi_1 + \varphi_2 - \frac{d_1 \varphi_1 \varphi_2}{n_2}.$$

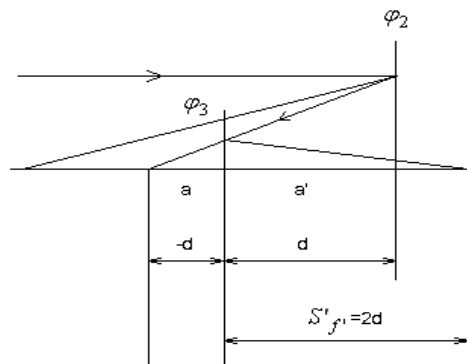


Рис. 1. Схема объектива

Объектив (рис. 2), выполнен на основе *ZNSE*, который обладает достаточно высокими физико-химическими свойствами и прозрачный в диапазоне спектра (0.5-12мкм), имеет следующую конструкцию и aberrации в разных диапазонах спектра [5].

С использованием ППП «SYNOPSIS» представляем результат aberrационного расчета для трех диапазонов спектра. Расчет приводился для зеркально-линзового объектива с конструктивными параметрами:

$f' = 100$ мм, $2w = 10^\circ$, $D/f' = 1:1$, $\Delta\lambda = 0.486 - 12$ мкм.

f' - фокусное расстояние, $2w$ - угол поля зрения, D/f' – относительное отверстие, $\Delta\lambda$ - диапазон длин волн.

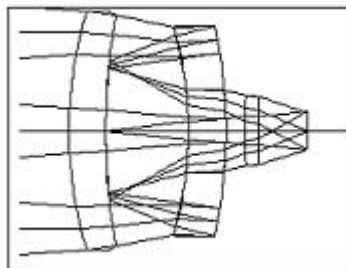
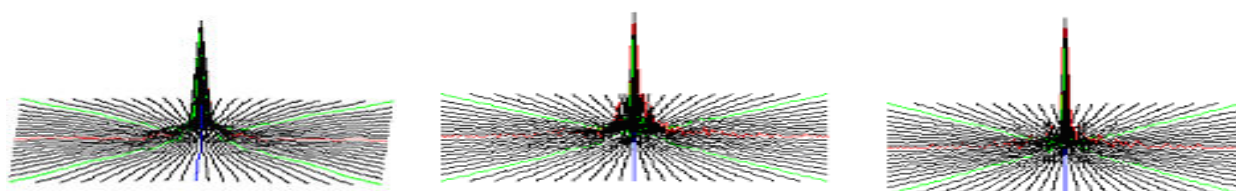


Рис. 2. Оптическая схема объектива

На рис. 3, 4, 5 для сравнения результатов в каждом из диапазонов спектра, представлена функция распределения энергии в точке.

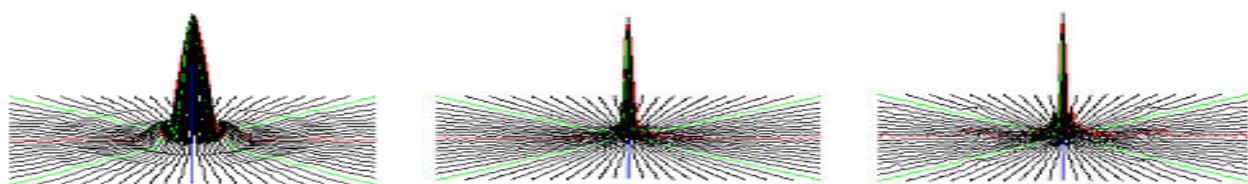


Y=0.0 на оси

Y=0.7 на зоне

Y=1.0 на краю

Рис. 3. Визуальный диапазон спектра (0.486-0.656) мкм

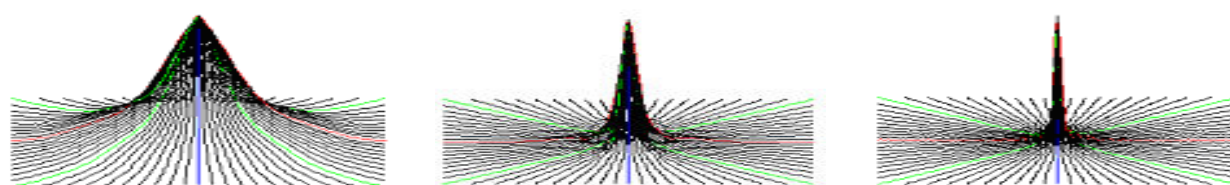


Y=0.0 на оси

Y=0.7 на зоне

Y=1.0 на краю

Рис. 4. Тепловизионный диапазон спектра (3-5) мкм



Y=0.0 на оси

Y=0.7 на зоне

Y=1.0 на краю

Рис. 5. Тепловизионный диапазон спектра (8-12) мкм

Полученные результаты по всем диапазонам спектра, показали допустимые значения aberrаций в каждом из диапазонов. Это в свою очередь, доказывает то, что данный многоспектральный зеркально-линзовый объектив на основе теоретического расчета имеет достаточно хорошее изображение в каждом из диапазонов спектра, хотя и требует некоторой доработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Jamieson T.H. Ultrawide waveband optics // Optical Engineering. – 1984. – № 2. – С.111-116.
2. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем [Текст] / Г.Г. Слюсарев. – Л.: Машиностроение, 1975. – 250 с.
3. Гаврилов Д.В. Расчет простой линзы с одной отражающей поверхностью [Текст] / Д.В. Гаврилов // Оптика и спектроскопия. – 1962. – Т. 13. – С. 436–431.
4. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем [Текст] / Г.Г. Слюсарев. – изд. 2-е, доп. и перераб – Л. Машиностроение, 1969. – 372 с.
5. Оптико-механические и оптико-электронные приборы [Текст]: межвуз. сб. – Новосибирск: НИИГАиК, 1985. – 163 с.

© М.П. Егоренко, 2005

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МНОГОКРАТНОЙ ДИФРАКЦИИ В ОПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

Известны оптические схемы монохроматоров и спектрографов разработанные на основе многократной дифракции [1]. В этих схемах дифрагировавшая на дифракционной решетке волна направляется повторно на эту же решетку. Для некоторых схем спектральных приборов возможно и осуществление n -кратной дифракции, что позволяет в n раз увеличить дисперсию и разрешение [1]. Но в разработанных схемах многократную дифракцию испытывает только одна волна (выбранного порядка дифракции), поэтому можно считать, что в этих схемах использован наиболее простой вариант метода многократной дифракции. Другой более сложный вариант метода многократной дифракции заключается в следующем: дифрагировавшие волны двух выбранных порядков, в том числе и нулевого порядка, повторно (многократно) направляются на эту же решетку и затем регистрируется интерференционная картина при наложении повторно (многократно) дифрагировавших волн. Возможности практического применения второго варианта метода многократной дифракции значительно шире. Целью настоящей работы является обзорный анализ применения этого варианта метода многократной дифракции в различных оптических устройствах.

В обзорной работе [1] рассмотрены автоколлимационный и обратно – круговые (циклические) оптические схемы сисамов, разработанные на основе метода многократной дифракции. В качестве примера на рис. 1 представлена автоколлимационная схема сисама [1], представляющая собой интерферометр с отражательной дифракционной решеткой и фотоприемник 1. Решетка 2 выполняет одновременно функции амплитудного делителя и дисперсионного элемента. В этой схеме на отражательную дифракционную решетку 2 с симметричным профилем штрихов падает излучение с широким спектром. Дифрагировавшие волны положительного и отрицательного порядков отражаются от плоских зеркал 3, 4 и направляются для повторной дифракции на решетку 2. Повторно дифрагировавшие волны распространяются навстречу падающей волне и попадают на фотоприемник 1. Изменение разности хода (модуляция) двух повторно дифрагировавших волн осуществляется либо поступательным смещением одного из зеркал 3, 4 вдоль оси падающих на зеркала волн, либо смещением решетки 2 вдоль направления первоначально падающей волны (в направлении, перпендикулярном штрихам). Сканирование рабочего диапазона спектра осуществляется поворотом в противоположные стороны зеркал 3, 4 вокруг оси дифракционной решетки, проходящей через центр решетки параллельно штрихам. Если размеры зеркал достаточно большие, то сканирование спектра можно получить вращением зеркал 3, 4 в противоположных направлениях на один и тот же угол вокруг собственных осей зеркал, проходящих через их центры параллельно оси решетки. Излучение нулевого порядка, отражающееся от решетки обратно, не модулируется и не

регистрируется фотоприемником 1. В этой схеме первоначально падающая волна и повторно дифрагировавшие волны распространяются параллельно. Схема рассчитывается так, что входная диафрагма и ее изображение совпадают. Поэтому свет поступает в интерферометр через одну половину круглой диафрагмы, а через вторую ее половину (на которой получается изображение первой половины) направляется на фотоприемник 1. Преимуществом этой схемы [1] является примерно двукратное увеличение дисперсии и разрешающей способности сисама. Другим преимуществом данной схемы является отсутствие преломляющих оптических и спектральных элементов, что позволяет использовать ее в дальней инфракрасной области. К недостаткам следует отнести увеличенные потери света.

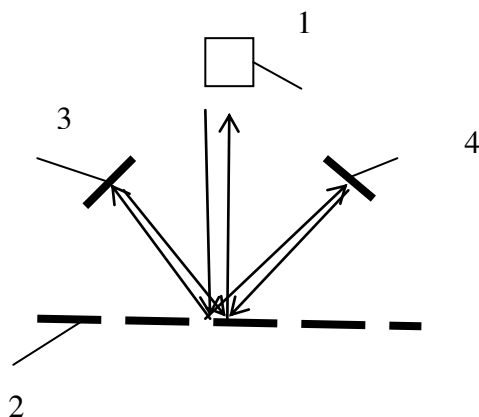


Рис. 1. Схема сисама с дифракционной решеткой

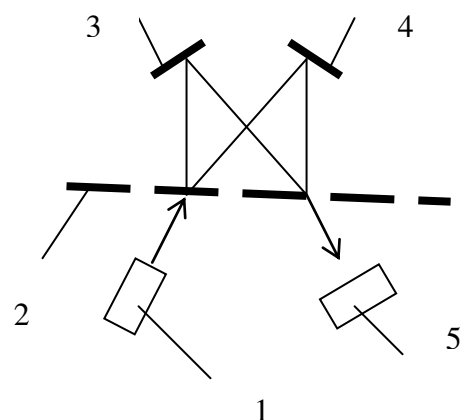


Рис. 2. Схема голографического датчика перемещений

Другим типом устройств, разработанных на основе метода многократной дифракции, являются устройства для измерения перемещений. На рис. 2 приведена схема датчика перемещений с одной парой отражательных элементов (зеркал) [2].

Принцип работы датчика заключается в следующем: плоская волна лазера 1 падает на дифракционную решетку 2, дифрагировавшие в выбранные порядки две волны, отражаясь от зеркал 3, 4, попадают на решетку для повторной дифракции. При этом среди волн, испытавших повторную дифракцию, выделяются и совмещаются в пространстве две волны выбранных дифракционных порядков, а полученная интерференционная картина регистрируется приемником 5 излучения. При линейном перемещении решетки 2 первоначально дифрагировавшие волны набирают разность фаз $\Delta\phi$, прямо пропорциональную произведению величины перемещения решетки на выбранные порядки дифракции.

При повторной дифракции этих волн и выборе в качестве интерферирующих двух волн, тех же порядков, что и при первой дифракции, разность фаз $\Delta\phi$ будет удвоена, следовательно, точность измерений перемещений удвоена. При n -кратной дифракции точность измерений будет

увеличена соответственно в n раз [2]. Но низкая дифракционная эффективность решеток ограничивает такую возможность увеличения точности измерений.

Достоинством этой схемы датчика является то, что смещение решетки в поперечном направлении не вносит погрешности в измерения. Так как при таком смещении решетки, угол падения волны лазера на решетку не изменяется, поэтому не изменяются углы дифракции и углы схождения волн. Расстояния, пройденные волнами, изменяются на одинаковые величины и разность их фаз не изменяется. В симметричной схеме [2] дифрагировавшие волны проходят одинаковые расстояния, поэтому снижаются требования к длине когерентности лазера.

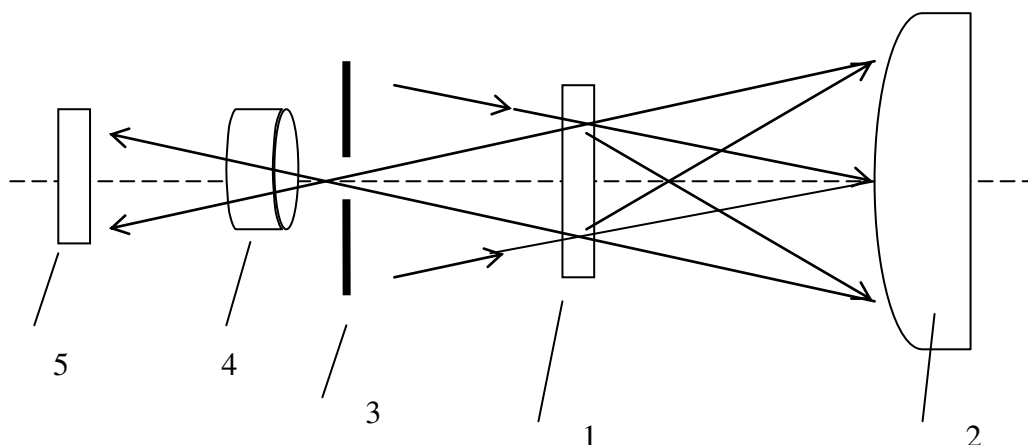


Рис. 3. Схема интерферометра для контроля формы поверхностей

Еще один интересный случай применения метода многократной дифракции – это интерферометр для контроля сферических и асферических поверхностей [3]. В отличие от рассмотренных выше случаев здесь дифрагируют сходящиеся и расходящиеся волны на зонной пластинке Френеля. Принципиальная схема устройства [3] представлена на рис. 3. Собственно интерферометр состоит из двух элементов: зонной пластинки 1 и контролируемой поверхности 2. Расстояние между этими элементами равно радиусу кривизны проверяемой поверхности. В наблюдательную часть входят диафрагма 3, объектив 4 и ПЗС-фотоматрица 5. Стандартная схема освещения, состоящая из источника, линзы и разделительного блока на рис. 3 не показана. В интерферометр из схемы освещения поступает сходящаяся волна. Нулевым порядком сходящейся волны после зонной пластинки собирается в точку в центре проверяемой поверхности. Затем, отражаясь от нее, направляется на зонную пластинку и повторно дифрагировавшая в первый порядок сходящаяся волна попадает на диафрагму 3. Эту волну авторы называют референтной (опорной). От первоначально сходящейся волны дифрагировавшая в первый порядок сходящаяся волна отражается от контролируемой поверхности и проходит повторно зонную пластину в нулевом порядке – эту волну авторы называют измерительной. Через диафрагму проходят только эти две волны. После объектива 4 в плоскости фотоматрицы ПЗС они формируют интерференционные полосы, содержащую информацию о форме проверяемой

поверхности. Отличительной особенностью этой схемы является равенство набега фаз при прохождении зонной пластинки в референтной и измерительной волнах. Поэтому различие волновых фронтов референтной и измерительной волн определяется формой поверхности 2.

Таким образом, метод многократной дифракции может с успехом применяться в различных по назначению устройствах. Отличительной особенностью этого метода является использование одного и того же дифракционного элемента. Совмещая разные порядки многократно дифрагировавших волн, можно добиться усиления или же погашения возникающих искажений в интерферирующих порядках. Также выбором волн определенных порядков дифракции можно получить стабильную интерференционную картину или же, наоборот, очень чувствительную к вибрационным и температурным изменениям элементов схемы. В работе рассмотрено применение лишь одного варианта метода многократной дифракции, причем для волн простой формы. Применение многократной дифракции сложных волновых фронтов, многократной дифракции с обращением волнового фронта дифрагировавших волн будут рассмотрены в последующих работах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов [Текст]/ И. В. Пейсахсон/Л: Машиностроение, 1975. – 312с.
2. А.с. № 1562686 СССР. Устройство для измерения линейных перемещений [Текст]/ С.А. Шойдин, Е.А. Сандер, Ю.Ц. Батомункуев и др. (Россия). – Заявл. 21.07.1988; опубл. 7.05.90. – Бюл. № 17.
3. Коронкевич В. П. Синтетическое пробное стекло [Текст]/ В. П. Коронкевич, Г. А. Ленкова, А. Е. Маточкин: Сборник трудов VI Междунар. конф. “ Прикладная оптика”, Т.3. – Санкт-Петербург, 2004. – С.225.

© Ю.Ц. Батомункуев, 2005

**ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ МИНИАТЮРНЫЙ МОНОХРОМАТОР В
МИКРОМЕХАНИЧЕСКОМ ИСПОЛНЕНИИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА**

В настоящее время во многих отраслях используются высокоточные измерительные монохроматоры различных видов.

Три вида монохроматоров [1]: монохроматор с использованием призмы, монохроматор с дифракционной решеткой, монохроматор на базе резонатора Фабри-Перо.

Недостатком всех этих приборов является их габаритные размеры, а также большое энергопотребление.

Целью настоящего исследования является разработка и исследование перестраиваемого оптического интерференционного фильтра (резонатора Фабри–Перо), основанного на принципах микромеханики, для использования в качестве монохроматора. Рассматривается возможность создания устройства, функционирующего в спектральных диапазонах от 0,4 до 0,8 и от 0,8 до 1,6 мкм.

Нами проведен расчет ожидаемых параметров микромеханического монохроматора. Возьмем за основу известную методику расчета резонатора Фабри–Перо, который является интерференционным прибором с многократно разделенными световыми пучками. Резонатор Фабри–Перо состоит из двух оптически прозрачных пластин, закрепленных с малым зазором друг относительно друга. Обращенные к зазору поверхности пластин являются полупрозрачными зеркалами.

Расчет проводится на основе анализа, приведенном в [2].

Интенсивность пропускания такого фильтра I зависит от коэффициента отражения, коэффициента пропускания, разности фаз между соседними пучками, интенсивности падающего пучка света и определяется по формуле

$$I = \frac{T^2}{(1-R)^2} \times \frac{I_0}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \frac{\varphi}{2}}, \quad (1)$$

где R – коэффициент отражения; T – коэффициент пропускания; φ – разность фаз между соседними пучками падающего света; I_0 – интенсивность падающего пучка света.

Разность фаз между соседними пучками зависит от расстояния между отражающими слоями d , показателя преломления среды n между отражающими слоями, угла падения r светового пучка, а также длины волны λ :

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2dn \cos r. \quad (2)$$

При прохождении светового пучка через любой отражающий слой, часть его интенсивности поглощается этим слоем в соответствии с условием

$$T + R + A = 1, \quad (3)$$

где A – коэффициент поглощения.

Расчеты фильтра проведем для типичных для этого класса приборов параметров: $I_0=1$, $R=0,05$, $T=0,85$, $A=0,1$, $n=1$, световой пучок падает по нормали к поверхности фильтра ($r=0^\circ$). Подставим выражение (2) в (1) и произведем преобразования, тогда:

$$I = \frac{T^2}{(1-R)^2} \times \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \frac{2\pi d}{\lambda}}, \quad (4)$$

$$I = \frac{0,85^2}{(1-0,05)^2} \times \frac{1}{1 + \frac{4 \times 0,05}{(1-0,05)^2} \sin^2 \frac{2\pi d}{\lambda}} = \frac{0,8}{1 + 0,22 \sin^2 \frac{2\pi d}{\lambda}}. \quad (5)$$

На рис. 1 приведен спектр пропускания интерференционного фильтра, рассчитанный при помощи формулы (5) для указанных выше параметров и различных толщин зазора.

Толщина d зазора определяется выражением (6)

$$d = m \frac{\lambda}{2}, \quad (6)$$

где m – порядок спектра, λ – длина волны.

Особенности полученного спектра:

– Спектральная ширина полосы пропускания на уровне 0,5 равна: для графика I – 18 нм, II – 27 нм, а для графика III – 36 нм.

– Необходимо отметить, что при величинах воздушного зазора более 400 нм появляется второй пик спектральной полосы пропускания, который обусловлен работой фильтра на втором порядке спектра

Из рис. 1 видно, что при зазоре между зеркалами 400 мкм полоса пропускания перестраиваемого фильтра соответствует приблизительно октаве. Схематически конструкция разработанного нами фильтра показана на рис. 2. На внутренние поверхности прозрачных дисков нанесен отражающий слой с коэффициентом пропускания T . Зазор между этими слоями первоначально задается с помощью вспомогательной диэлектрической пленки. После окончательной сборки перенастраиваемого оптического интерференционного фильтра эта пленка удаляется и величину зазора (уже воздушного) можно регулировать путем изменения геометрических размеров внешнего цилиндра. Для этого можно использовать магнитострикционные эффекты.

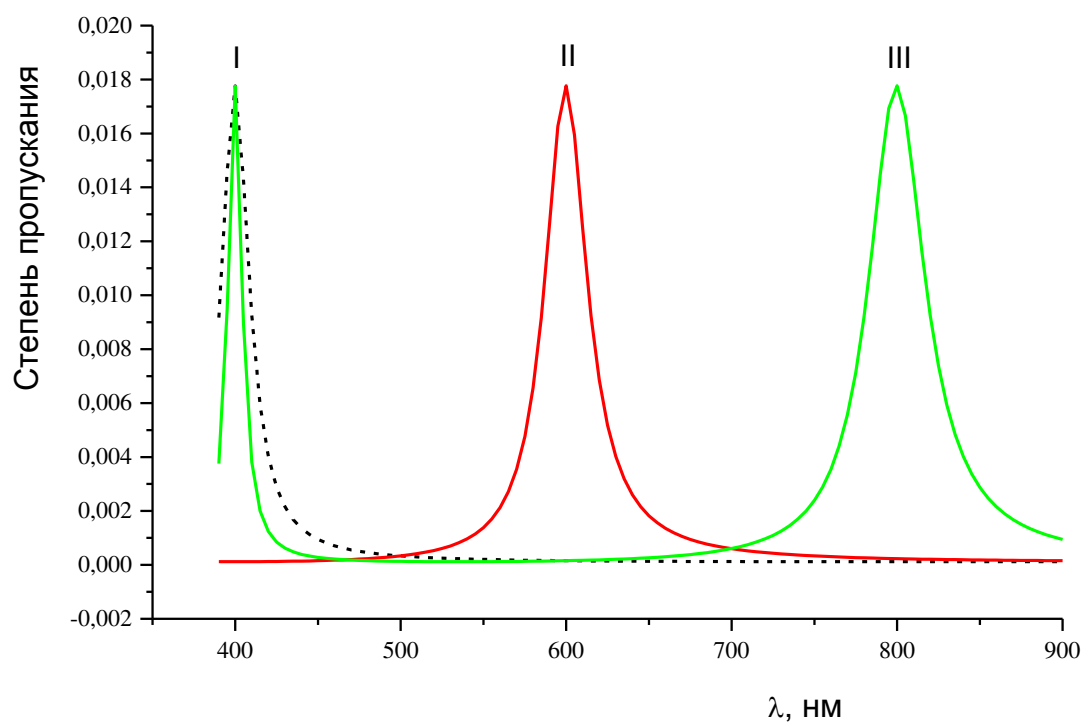


Рис. 1. Зависимость интенсивности пропускания от длины волны при $d=200$ нм (I), $d=300$ нм (II), $d=400$ нм (III)

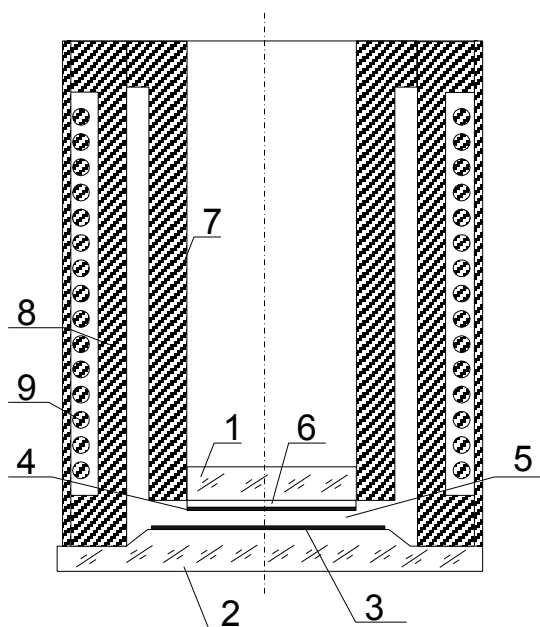


Рис. 2. Конструкция перестраиваемого интерференционного фильтра:

1, 2 – стеклянная подложка; 3, 4 – зеркальные слои Al; 5 – воздушный зазор; 6 – прозрачный клей; 7 – внутренний цилиндр; 8 – внешний цилиндр; 9 – витки проволоки

Для обеспечения устойчивой работы монохроматора при изменениях температуры внешней среды в качестве материала цилиндра 7 выбран инвар.

Проведем оценочный расчет размеров монохроматора.

Для обеспечения работы монохроматора в диапазоне длин волн от 0,4 до 0,8 мкм, как следует из (6), зазор должен изменяться в пределах от 0 до 0,4 мкм на первом порядке интерференции, т. е. $m = 1$ в (6).

Для инвара рабочий диапазон напряженности магнитного поля изменяться от 0 до $80 \cdot 10^4$ А/м; магнитострикция удлинения образца при $H = 8 \cdot 10^4$ А/м составляет $\Delta l/l = 10^{-5}$ [3].

Учитывая, что в замкнутом магнитопроводе, образованном внешним цилиндром и корпусом, длина силовых линий магнитного поля приблизительно равна $2 \cdot l$, где l длина внешнего цилиндра, можно записать:

$$H = N \times I / 2l \quad (7)$$

Для приведенных выше параметров магнитострикционного преобразователя найдем:

$$N \times I = 6400 (A \times v) \quad (8)$$

Одной из основных задач является получение плоскопараллельности отражающих слоев. Это становится возможным путем нанесения жертвенного слоя на слой Al, который в точности повторяет рельеф слоя Al (рис. 3). Затем наносят второй слой Al, который является вторым зеркалом резонатора.

Получения малого зазора, большой площади ($S = 10 \text{ мм}^2$), является сложной задачей не только с конструктивной точки зрения, но и с технологической. В качестве материала жертвенного слоя выбран маннит [4].

Нами было опробовано несколько вариантов удаления жертвенного слоя: химическое травление и термическое испарение. Лучшим оказалось термическое испарение.

При изготовлении многослойной структуры получены слой с толщиной $\Delta l = 0,15$ мкм (удовлетворяющий условию $A + T = 0,85$). Спектральные кривые, вычисленные по формуле (5), показаны на рис. 1. Анализ показал, что жертвенный слой должен иметь толщину порядка 0,08 мкм, т.к. конструкция рассчитана на увеличение воздушного зазора.

Габаритные размеры созданного экспериментального образца: диаметр – 20, длина 35 мм.

Масса: 100 гр.

Спектральный диапазон: от 0,4 до 0,8 мкм.

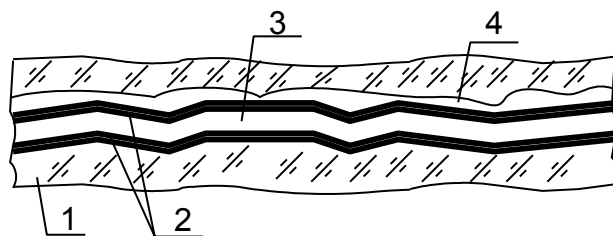


Рис. 3. Схема получения эквидистатного зазора микромеханического резонатора Фабри-Перо перестраиваемого интерференционного фильтра:

1 – стеклянная подложка; 2 – слой Al; 3 – жертвенный слой; 4 – клей.

Последующая работа будет направлена на создание микромеханического монохроматора, управляемого под действием электростатического поля, а так же на уменьшение предельно разрешимого спектрального интервала до 5 – 10 нм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рекламная информация <http://new.lomo.ru/>
2. Скоков И.В. Многолучевые интерферометры в измерительной технике [Текст] // И.В. Скоков–М.: Машиностроение, 1989.– 238 с.
3. Физический энциклопедический словарь, Том 3, [Текст] // М.: Государственное научное издательство «советская энциклопедия», 1963. – с.108-110
4. Чесноков Д.В., Чесноков А.Е. Исследование оптических характеристик управляемого микромеханического светофильтра // Современные проблемы геодезии и оптики 71 научно-техническая конференция СГГА. – (2004).

© Д.В. Чесноков, А.Е. Чесноков, 2005

УДК 531.715:621.383

Н.Р. Рахимов

СибНИА, Новосибирск;

С.Х. Шамирзаев

ФТИ, Ташкент

ОПТОЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЛИСТОВОГО СТЕКЛА

В настоящее время для получения качественного стандартного листового стекла в технологическом процессе применяется устройство, состоящее из источника света, многогранного вращающегося зеркала направляющего поток света через фокусирующую линзу на контролируемое двух фотоэлектрических преобразователей, установленных в потоке света, прошедшего через стекло и электронного регистратора сигналов, подключенного входами к фотоэлектрическим преобразователям и выполненного в виде регистратора интервала времени между сигналами фотоэлектрических преобразователей [1].

Однако, данное устройство обладает низкой точностью измерения толщины листового стекла из-за имеющихся поверхностных или внутренних дефектов, стекла рассеивающих свет, возникают погрешности измерения, сведанные с «размытостью» светового потока и его модуляцией по интенсивности в зависимости от характера дефекта. А также устройство имеет сложную конструкцию.

Недостатком известного измерителя толщины листового стекла является низкая точность: из-за непрозрачного фильтра и сканера луч света преломляется неточно. Он также имеет сложную конструкцию.

Нами поставлена цель создания оптоэлектронного бесконтактного измерителя толщины стекла, т.е. упрощение конструкции и повышение точности.

С этой целью было разработана система [2], в котором в измерителе светоизлучающие диоды (СИД) установлены: первый СИД₁ под углом, например, 35°, и светоизлучающий диод СИД₂ установлен перпендикулярно к поверхности контролируемого объекта и три приёмника оптического излучения

(ПОИ) установлены: первый (ПОИ₁) перед контролируемым объектом под углом, например, 35°, второй приёмник оптического излучения (ПОИ₂) после контролируемого объекта под углом, например, 35° и третий приёмник оптического излучения (ПОИ₃) установлен перпендикулярно перед СИД₂ после контролируемого объекта, при этом импульсы задающего генератора (генератор импульсного питания) подаются на коммутатор, разделённые импульсы подаются поочерёдно к светоизлучающим диодам СИД₁ и СИД₂, излучение СИД₁ регистрируется ПОИ₁ и проходя через контролируемый объект регистрируется ПОИ₂, а излучения СИД₁ проходя через контролируемый объект регистрируется ПОИ₃. Отношение сигналов ПОИ₁ и ПОИ₂ сравнивается сигналом ПОИ₃ в блоке обработки фотозлектрического сигнала, далее через усилитель подаются на измерительный прибор.

На рис. 1 представлена блок-схема оптоэлектронного бесконтактного измерителя толщины листового стекла.

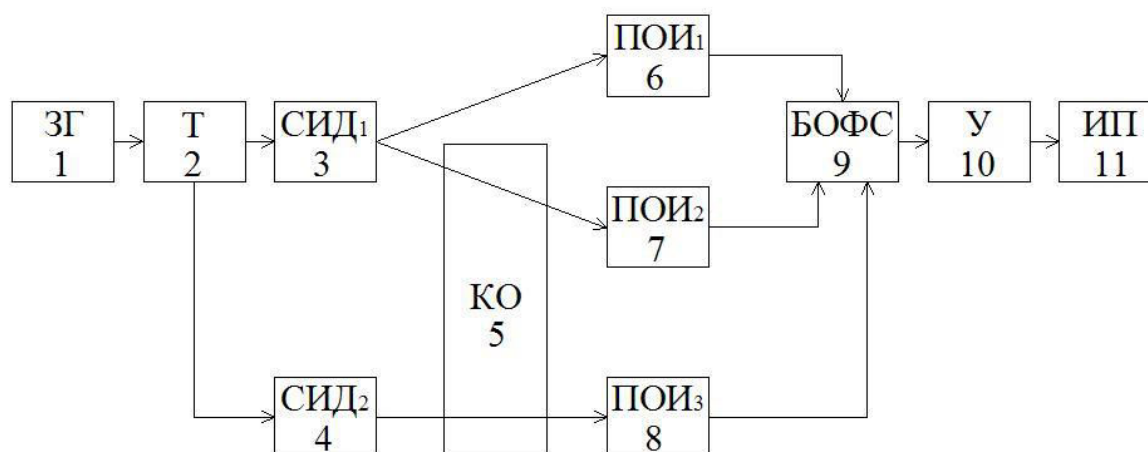


Рис. 1. Блок-схема оптоэлектронного бесконтактного измерителя толщины листового стекла

Измеритель содержит задающий генератор (источник импульсного питания) 1, коммутаторы (триггеры) 2, светоизлучающие диоды СИД₁ (3) и СИД₂ (4), измеряемое стекло 5, приёмники оптического излучения 6, 7 и 8, блок обработки фотозлектрического сигнала 9, усилитель 10 и измерительный прибор 11.

Измеритель работает следующим образом.

Импульсы генератора 1 с частотой 8-10 кГц подаются на вход коммутатора 2. Разделённые импульсы подаются на светоизлучающие диоды СИД₁ (3) (измерительный) и СИД₂ (4) (компенсационный). Поток излучения измерительного светоизлучающего диода СИД₁ подаются на фотодиод ПОИ₁ (6) и через контролируемый объект 5, подаётся на идентичный фотодиод ПОИ₂ (7). Излучение компенсационного светоизлучающего диода СИД₂ проходя через контролируемый объект тоже попадает на идентичный фотодиод ПОИ₃ (8).

Далее эти сигналы поступают в блок обработки фотоэлектрического сигнала БОФС 9, где реализуется отношение сигналов $ПОИ_1$ и $ПОИ_2$ и сравнение сигналов $ПОИ_3$ подаётся в усилитель 10. Сигнал пропорциональный величине толщины, подаётся на измерительный прибор ИП 11.

Структурная схема измерителя (рис. 2) включает в себя: К–коммутатор, R1–переменное сопротивление для регулировки тока СИД₁, R2–переменное сопротивление для регулировки тока СИД₂, R3–шунтирующая нагрузка на $ПОИ_1$ -фотодиод ФД-24К, R4–шунтирующая нагрузка на $ПОИ_2$ -фотодиод ФД-24К, R5–шунтирующая нагрузка на $ПОИ_3$ -фотодиод ФД-24К. БОФС–Блок обработки фотоэлектрического сигнала.

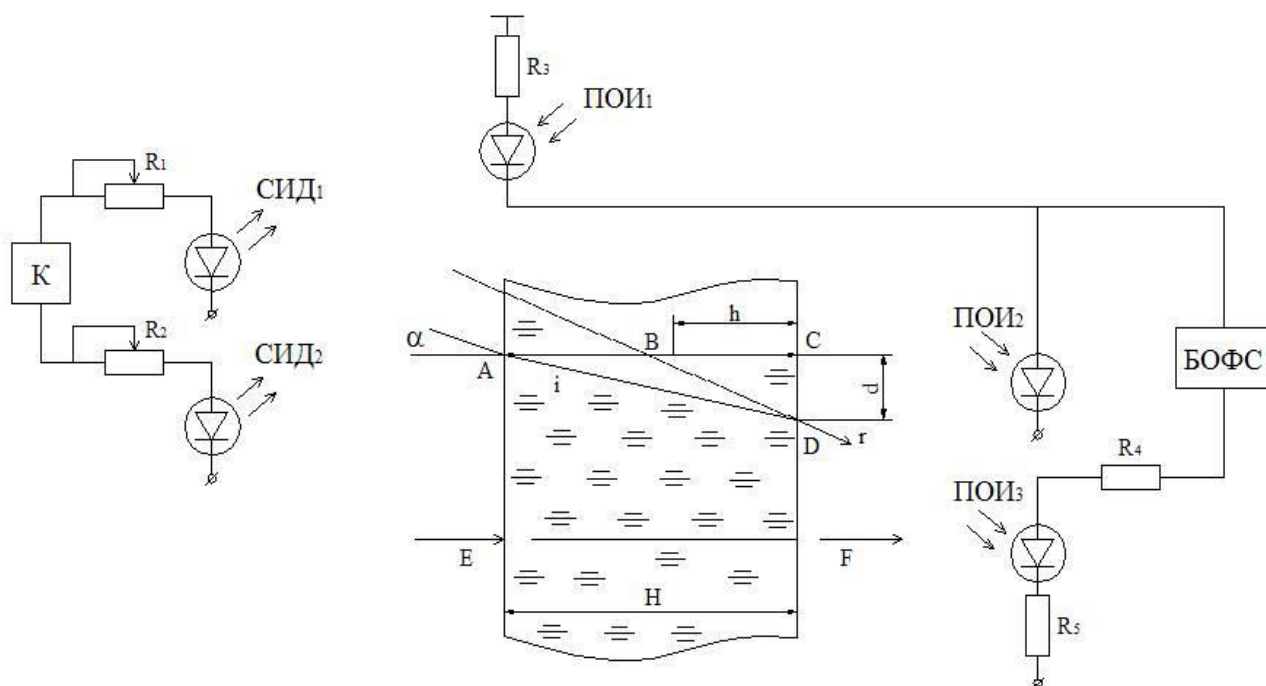


Рис. 2. Структурная схема оптоэлектронного бесконтактного измерителя толщины листового стекла

Пусть из СИД₁ идёт излучение под углом α ($\alpha \approx 35^\circ$) (одновременно под таким же углом попадает на $ПОИ_1$), пройдя расстояние AD и преломляясь попадает на $ПОИ_2$. AD –расстояние прохождения потока излучения, падающего на верхнюю поверхность под малым углом α ; поток излучения из СИД₂ падает перпендикулярно к поверхности стекла и попадает на $ПОИ_3$. EF –расстояние прохождения потока излучения, падающего перпендикулярно на верхнюю поверхность стекла.

Для нахождения толщины H стекла рассмотрим

$\triangle ACD$: $|AC| = |CD| / \operatorname{tg} i$, или $|AC| = H$ и $|CD| = d$

$$H = \frac{d}{\operatorname{tg} i} \quad (1)$$

А d можно определить из $\triangle BCD$: $|CD| = |CB| / \operatorname{tg} r$, или учитывая что $|CD| = d$ и $|CB| = h$, $d = h \operatorname{tg} r$. Тогда $H = h \operatorname{tg} r / \operatorname{tg} i$.

Поскольку углы r и i малы, отношение тангенсов этих углов можно заменить отношением их синусов, т.е.

$$\operatorname{tg} r / \operatorname{tg} i \approx \sin r / \sin i \quad (2)$$

Следовательно,

$$H = h \sin r / \sin i \quad (3)$$

Отсюда видно, что толщина H прямо пропорциональна $h \sin r$, т.е. угол r изменяется в зависимости от толщины стекла.

Регистрируя ПОИ₂ на сколько меняется угол r , определим H .

А для регистрации дефектов и загрязнений, цвета и т.д. использован оптрон СИД₂–ПОИ₃, как опорный.

Предлагаемая оптоэлектронная система позволяет упростить конструкцию устройства за счёт исключения блока сканирования светового луча, выполненного в виде зеркального барабана, закреплённого на валу электродвигателя, функцию которого попеременно выполняют задающий генератор, светодиоды, фотодиоды и резисторы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.с. СССР 920369 // Изобретения. 1982 г. № 21
2. Бесконтактный измеритель толщины листового стекла / Рахимов Н.Р., Шамирзаев С.Х. // Пол. решение к выдаче патента РУз IAP 20030901 от 10.02.2004.

© Н.Р. Рахимов, С.Х. Шамирзаев, 2005

ПРИНЦИП ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ОДНОГО ВЕЩЕСТВА В ДРУГОМ НА ОСНОВЕ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Оптоэлектронные датчики определения содержания одного вещества в другом, измеряющие ослабление светового пучка в оптически прозрачных средах, могут быть использованы для создания датчиков, определяющих как вид, так и концентрацию различных примесей, что имеет принципиальное значение для контроля различных технологических процессов и решения экологических задач. Спектральный диапазон 0,9...3 мкм чрезвычайно интересен для прикладной спектроскопии, поскольку в этой области сосредоточено большое количество специфических для химических соединений полос поглощения. Наибольшего внимания, по-видимому, заслуживает диапазон 1...1,7 мкм. В этой области спектра в качестве излучателей могут быть использованы эффективные излучающие диоды и гетеролазеры на основе твердых растворов InGaAsP и изопериодических InP, технология изготовления которых достаточно хорошо разработана.

На основе данных излучателей и приемников оптического излучения в работе [1] представлено устройство для определения содержания одного вещества в другом, состоящее из генератора импульсов переменного тока, двух светодиодов, один из которых излучает на опорной длине волны, а другой – на измерительной, двух диодов, резистора и дополнительного резистора с переменным сопротивлением, через который соединены катоды двух светодиодов, блока обработки фотоэлектрического сигнала, анод первого светодиода через резистор подведён к выходу генератора, другой выход которого подключен к аноду второго светодиода и с общей шиной. Оба светодиода оптически связаны с размещённой между ними кюветой с анализируемым веществом.

Недостатком данного устройства является сложность конструкции, затрудняющая обеспечение надёжности контроля. Поэтому нами поставлена задача создания устройства для определения содержания одного вещества в другом упрощенной конструкции и повышенной надёжности.

Для этого в устройстве для определения содержания одного вещества в другом, включающем светодиод с опорной длиной волны и светодиод с измерительной длиной волны, оптически связанные с размещённой между ними кюветой с анализируемым веществом, генератор импульсов переменного тока, резистор с переменным сопротивлением, блок обработки фотоэлектрического сигнала, светодиоды включены встречно-параллельно, при этом первые разноименные выводы светодиодов подключены к первому выходу генератора импульсов переменного тока, вторые разноименные выводы светодиодов подключены соответственно к крайним выводам резистора с переменным сопротивлением, средний вывод которого связан с общей шиной, а

раздельные входы блока обработки фотоэлектрического сигнала подсоединены соответственно к крайним выводам резистора с переменным сопротивлением и ко второму выходу генератора импульсов переменного тока.

На рис. 1 показана схема устройства [2].

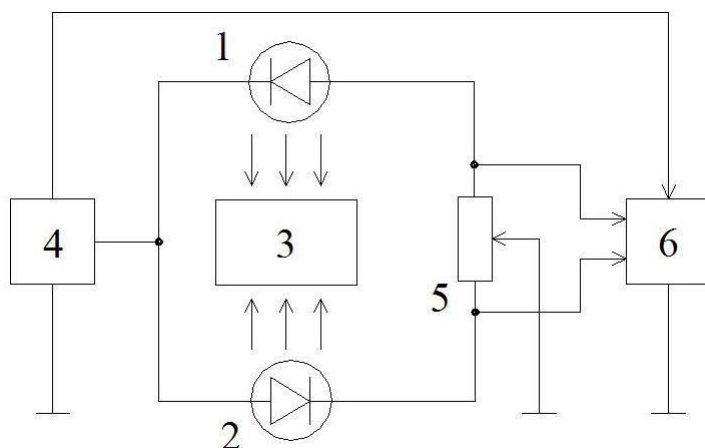


Рис. 1. – Устройство для определения содержания одного вещества в другом

Устройство для определения содержания одного вещества в другом состоит из светодиода 1 с опорной длиной волны и светодиода 2 с измерительной длиной волны, оптически связанных с размещенной между ними кюветой 3 с анализируемым веществом, генератора импульсов переменного тока 4, резистора 5 с переменным сопротивлением, блока обработки фотоэлектрического сигнала 6. Светодиоды 1 и 2 включены встречно-параллельно. Первые разноимённые выводы светодиодов 1 и 2 подключены к первому выходу генератора импульсов переменного тока 4. Вторые разноимённые выводы светодиодов 1 и 2 подведены соответственно к крайним выводам резистора 5 с переменным сопротивлением, средний вывод которого связан с общей шиной. Раздельные входы блока обработки фотоэлектрического сигнала 6 подсоединены соответственно к крайним выводам резистора 5 с переменным сопротивлением и ко второму выходу генератора импульсов переменного тока 4.

Устройство работает следующим образом.

Генератор импульсов переменного тока 4 вырабатывает периодическую последовательность импульсов переменного тока. Сформированный ток в течение действия, например, положительного полупериода импульса, включает светодиод 2, ток проходит через него и через нижний крайний и средний выводы резистора 5.

Этот ток вызывает свечение светодиода 2, который излучает на опорной длине волны. Это излучение проходит через анализируемое вещество в кювете 3 и попадает на светочувствительную поверхность светодиода 1, к катоду которого приложено положительное напряжение и который в течение действия положительного полупериода работает как фотодиод. Прошедший через кювету 3 световой поток светодиодом 1 (в данный момент фотодиод) преобразуется в фотоэлектрический сигнал, который снимается с верхнего крайнего вывода резистора 5 относительно среднего вывода, связанного с общей шиной. Этот

сигнал подается на вход блока обработки фотоэлектрического сигнала 6, второй вход которого в данный момент заперт сигналом от выхода генератора импульсов переменного тока 1.

При действии отрицательного полупериода ток протекает через светодиод 1, который излучает на измерительной длине волны, и выводы резистора 5.

Излучение от светодиода 1 проходит через кювету 3 и попадает на светочувствительную поверхность светодиода 2, к аноду которого приложено отрицательное напряжение. При действии отрицательного полупериода светодиод 2 работает в фотодиодном режиме. Сигнал отрицательности с другого крайнего вывода резистора 5 подается на вход блока обработки фотоэлектрического сигнала 6. Первый вход в этот момент времени заперт сигналом с выхода генератора импульсов переменного тока 1. В блоке обработки фотоэлектрического сигнала 6 обеспечивается деление сигналов от потоков опорного и измерительного светодиодов, пропорциональное контролируемому параметру, например, влажности.

Сущность метода заключается в следующем.

Под понятием содержание одного вещества в другом следует понимать содержание, например, воды или газа, или красителей в другом веществе, например в ацетоне, или в керосине, или в бензине, или в ткани и т. д., или влажности, вода – одно вещество, материал – другое вещество.

Определение содержания одного вещества в другом происходит следующим образом.

Длина волны одного из светодиодов, измерительного, лежит на полосе поглощения одного вещества (влаги), например двухкомпонентной среде, длина волны другого светодиода, опорного, лежит вне полосы поглощения и служит для компенсации неинформативных параметров (толщина, плотность и т. д.).

При облучении контролируемого материала (объекта) световые потоки определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \Phi_{01} e^{-k_1 \beta} \\ \Phi_2 &= \Phi_{02} e^{-k_1 \beta_1} e^{-k_2 \alpha} \end{aligned} \quad (1)$$

где Φ_{01} , Φ_{02} – начальные потоки от первого опорного и второго измерительного светодиодов соответственно; α – одно вещество, например количество влаги; β – второе вещество, например масса материала, вещества, в котором определяется влага; k_1 , k_2 – коэффициенты, зависящие от рассеивающих свойств контролируемого объекта и длины волны излучения светодиодов.

Если эти потоки преобразовать в электрические сигналы при помощи фотоприёмника (в нашем случае каждый из светодиодов поочередно в зависимости от полярности импульсов питания работают то в режиме фотоприёмника, то в режиме светодиода), получим

$$\begin{aligned} U_1 &= A \Phi_{01} e^{-k_1 \beta} \\ U_2 &= B \Phi_{02} e^{-k_1 \beta_1} e^{-k_2 \alpha} \end{aligned} \quad (2)$$

где A и B – коэффициенты преобразования светодиодов, работающих в режиме фотоприемника, потока излучения в электрический сигнал.

Если установить равенство начальных значений потоков излучения по реакции светодиодов, работающих в режиме фотоприёмника, т.е. $A\Phi_{01} = B\Phi_{02}$, что нетрудно обеспечить, изменяя токи, протекающие через светодиоды, и реализуя отношение сигналов от опорного и измерительного потоков в блоке обработки фотоэлектрического сигнала, получим

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{A\Phi_{01} e^{-k_1\beta}}{B\Phi_{02} e^{-k_1\beta_1} e^{-k_2\alpha}} \quad (3)$$

Логарифмируя значение, получим

$$\ln U_1 - \ln U_2 = k_2\alpha \text{ или } U = k_2\alpha, \quad (4)$$

т.е. сигнал, пропорциональный величине контролируемого параметра (одного первого вещества) в веществе другого.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мухитдинов М., Мусаев Э.С. Оптические методы и устройства контроля влажности. – М.: Энергоатомиздат, 1986, 96 с.

2. Устройство для определения содержания одного вещества в другом / Рахимов Н.Р., Тожиев Р.Ж. и др. // Патент РУз IDP 05056 от 28.02.2002 г.

© А.Н. Серьезнов, Н.Р. Рахимов, С.А. Холматов, 2005

УДК 621.315.592

В.Я. Костюченко

СГГА, Новосибирск

Д.Ю. Протасов

ИФП СО РАН, Новосибирск

ДИАГНОСТИКА ПАРАМЕТРОВ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ В Р-КРТ МЕТОДОМ МАГНИТОФОТОПРОВОДИМОСТИ

Введение

Тройной раствор $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (КРТ), где x – мольное содержание Cd , на сегодняшний день является основным материалом для изготовления фотоприемников инфракрасного излучения в дальнем ($10\div 12$ мкм) и среднем ($5\div 6$ мкм) диапазонах. Подвижность неосновных носителей является одним из основных параметров полупроводника, который во многом определяет свойства фотоприемников. Наряду со временем жизни, она определяет диффузионную длину, которая является ключевым параметром при изготовлении фотоприемников с высокими характеристиками.

Нами предложен прямой метод определения подвижности неосновных электронов, основанный на измерении магнитополевых зависимостей фотопроводимости в геометрии эффекта Холла (магнитофотопроводимости – МФП).

Образцы и экспериментальная установка

Исследовались образцы, изготовленные из пленок, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из GaAs ориентации (013) [1].

На подобных образцах изготавливались фотоприемники с высокими характеристиками [2, 3].

Для измерения МФП, эффекта Холла и магнитосопротивления вырезались образцы в виде прямоугольных полосок длиной 10 мм и шириной 1.5 мм. Затем они укреплялись на сапфировой подложке, и к ним делались контакты, как показано на рис. 1.

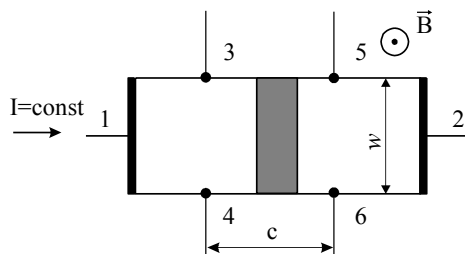


Рис.1. Схема измерения МФП. Освещенная часть образца заштрихована. Ток проходит через контакты 1,2; МФП и магнитосопротивление измеряются с контактов 3,5 или 4,6; эффект Холла – с контактов 3,4 или 5,6

Для образцов КРТ были измерены магнитополевые зависимости сигнала МФП в диапазоне температур $77 \div 300$ К. Эффект Холла и магнитосопротивление были измерены при температурах $77 \div 300$ К.

Для измерения магнитофотопроводимости образец дополнительно освещался светодиодом с длиной волны $\lambda=0.94$ мкм. Излучение, не попадая на контакты, направлялось узкой диафрагмой на центральную область образца параллельно магнитному полю.

Экспериментальная установка и методика измерений описаны в [4].

Теория

Для образцов в виде «холловский мостика» при направлениях электрического и магнитного полей, как показано на рис. 1, продольное напряжение U_σ при измерении с контактов 3 и 5 (или 4 и 6) в режиме генератора постоянного тока определяется выражением [5]:

$$U_\sigma(B) = \frac{c \cdot I}{w \cdot d} \cdot \frac{1}{\sigma(B)} \quad (1)$$

где c – расстояние между потенциальными контактами 3 и 5 (или 4 и 6), w и d – ширина и толщина образца, I – ток через образец.

Выражение для проводимости в магнитном поле при наличии электронов и дырок имеет вид [5]:

$$\sigma(B) = q \frac{n^2 \mu_n^2 (1 + \mu_p^2 B^2) + p^2 \mu_p^2 (1 + \mu_n^2 B^2) + 2np\mu_n\mu_p (1 - \mu_n\mu_p B^2)}{n\mu_n (1 + \mu_p^2 B^2) + p\mu_p (1 + \mu_n^2 B^2)} \quad (2)$$

где p и n – концентрации дырок и электронов, μ_p и μ_n – подвижности дырок и электронов, соответственно.

Проводимость образца меняется вследствие генерации светом неравновесных носителей. Свет попадает на образец через узкую диафрагму

прямоугольной формы, что исключает влияние контактов, так как расстояние от краев диафрагмы до контактов значительно превышает длину диффузии неравновесных носителей.

При низком уровне возбуждения для магнитофотопроводимости получаем следующие выражения:

Для низких температур, когда $n_0 \ll p_0$ и существенна роль рекомбинации Шокли-Рида:

$$\Delta U_{\sigma}(B) = -\frac{c \cdot I}{w \cdot d} \cdot \frac{\Delta n}{q} \cdot \frac{\mu_n}{p_0^2 \mu_p^2 (1 + \mu_n^2 B^2)} - \frac{c \cdot I}{w \cdot d} \cdot \frac{\Delta n}{q} \cdot \frac{K}{p_0^2 \mu_p} \quad (3)$$

где K – коэффициент, учитывающий захват электронов на ловушки.

По магнитолевой зависимости сигнала $\Delta U_{\sigma}(B)$, которая описывается выражением (3), можно определить подвижность. Для этого необходимо измерить величину магнитной индукции B_{Π} (Тл), соответствующую уровню сигнала $\Delta U_{\sigma}(0)/2$. В этой точке выполняется условие $1 + \mu_n^2 B_{\Pi}^2 = 2$, откуда легко получается формула для подвижности:

$$\mu_n = 1/B_{\Pi}^2 \text{ (м}^2/\text{Вс)}. \quad (4)$$

Для высоких температур, когда преобладает Оже-рекомбинация:

$$\Delta U_{\sigma}(B) = -\frac{c \cdot I}{w \cdot d} \cdot \frac{\Delta \sigma(B)}{\sigma^2(B)} = -\frac{c \cdot I}{w \cdot d} \cdot \frac{\Delta n}{e} \cdot \frac{\mu_n}{\left[(n\mu_n + p\mu_p)^2 + (p-n)^2 \mu_n^2 \mu_p^2 B^2 \right]^2} \times$$

$$\times \left(\left(n\mu_n + p\mu_p \right)^2 + p\mu_p \mu_n^2 B^2 \left(2n\mu_n + p\mu_p \right) - p^2 \mu_p^3 \mu_n^3 B^4 \right) \quad (5)$$

При таких температурах возможно появление максимумов при $B \neq 0$ (рис. 2):

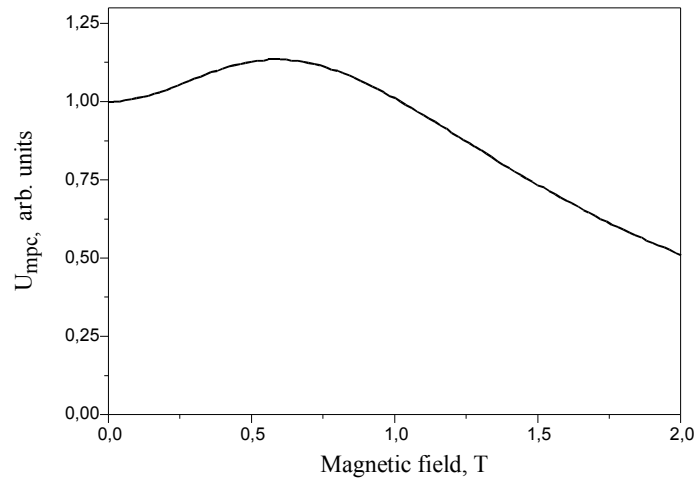


Рис. 2. Теоретическая кривая магнитофотопроводимости, рассчитанная по формуле (5) для параметров носителей: $\mu_n = 2 \text{ м}^2/\text{Вс}$, $n = 1 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $\mu_p = 0.02 \text{ м}^2/\text{Вс}$, $p = 1 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$

Причина появления максимума заключается в следующем. Как следует из (3), значение магнитофотопроводимости пропорционально соотношению $\Delta U_{\sigma} \sim \Delta\sigma(B) \cdot \rho(B)^2$. Проводимость неравновесных носителей $\Delta\sigma(B)$ уменьшается, а удельное сопротивление $\rho(B)$ равновесных носителей возрастает в магнитном поле, так как оно уменьшает эффективную подвижность носителей в направлении тянущего электрического поля [5]. Наличие двух конкурирующих процессов – уменьшение $\Delta\sigma(B)$ и увеличение $\rho(B)$, которые неодинаково изменяются в магнитном поле, и приводят к появлению максимумов магнитофотопроводимости.

Положение максимумов в зависимости от индукции магнитного поля B найдем из условия $d\Delta U_{\sigma}/dB = 0$. Учтя, что $\mu_n \gg \mu_p$, получаем:

$$B_{\max} = \sqrt{\frac{1}{2p} \cdot \frac{2n\mu_n - \mu_p(p^2 + 2n^2)}{\mu_p p^3 + \mu_n n(p^2 - pn + n^2)}} \cdot \frac{\mu_p p + \mu_n n}{\mu_p \mu_n} \quad (6)$$

В области температур, при которых происходит появление максимумов на МФП, $n^2 < p^2$. Тогда выражение (3) примет вид:

$$B_{\max} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{2n\mu_n - \mu_p p}{\mu_p p^3 + \mu_n np(p - n)}} \cdot \frac{\mu_p p + \mu_n n}{\mu_p \mu_n} \quad (7)$$

Отсюда следует условие появления максимумов на МФП:

$$\sigma_n \geq \frac{\sigma_p}{2} \quad (8)$$

Результаты

На рис. 4 приведены измеренные МФП образца КРТ для температур 77 К ($\square$) и 125 К ($\blacksquare$). Через экспериментальные точки проведены теоретические кривые, построенные по формуле (3). Подвижность электронов определена по формуле (4) и составляет $\mu_n = 8.1 \text{ м}^2/\text{Вс}$ для 77 К, $\mu_n = 3.6 \text{ см}^2/\text{Вс}$ для 125 К.

На рис. 4 приведены измеренные значения магнитофотопроводимости при температурах 77, 155 и 175 К для образца КРТ с $x = 0.222$.

Дополнительно к измерениям магнитофотопроводимости были измерены эффект Холла и магнитосопротивление. Определенные методом «спектра подвижности» значения концентраций и подвижностей электронов и дырок приведены в табл. 1 для сравнения.

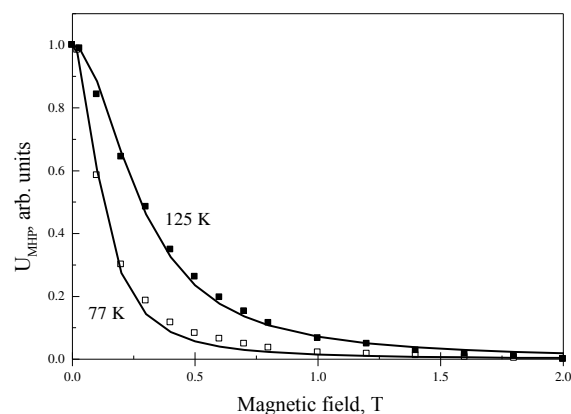


Рис. 3. МФП для образца КРТ при температур 77 К и 125 К. Подвижность электронов $\mu_n=8.1 \text{ м}^2/\text{Вс}$. $\square$ - эксперимент, — - теория

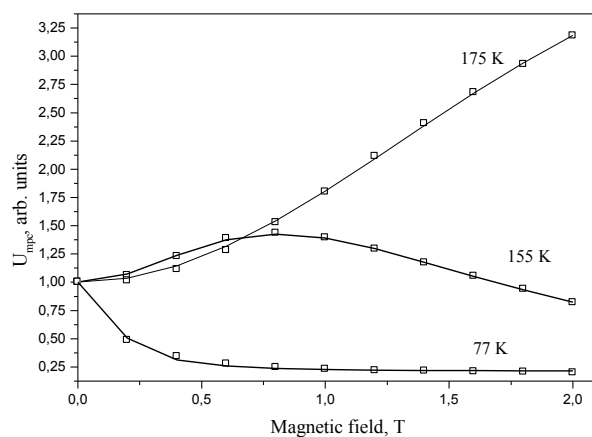


Рис. 4. Магнитофотопроводимость для температур 77, 155 и 175 К. $\square$ - эксперимент, сплошные линии – теория

Таблица 1. Значение концентраций и подвижностей носителей

Т, К	$\mu_n, \text{м}^2/\text{Вс}$		$\mu_p, \text{м}^2/\text{Вс}$		n, м^{-3}		p, м^{-3}	
	МФП	Спектр подвижности	МФП	Спектр подвижности	МФП	Спектр подвижности	МФП	Спектр подвижности
77	6.9	-	-	0.028		-	-	7.4×10^{21}
155	2.5	2.5	0.011	0.011	7.9×10^{19}	8.2×10^{19}	1.1×10^{22}	1.4×10^{22}
175	2.0	1.9	0.009	0.01	4.8×10^{20}	3.4×10^{20}	2.2×10^{22}	1.5×10^{22}

Теоретически и экспериментально исследована магнитофотопроводимость в образцах р-КРТ в диапазоне температур 77 – 300 К.

Показано, что метод магнитофотопроводимости можно применять для определения с высокой точностью параметров основных и неосновных носителей заряда.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

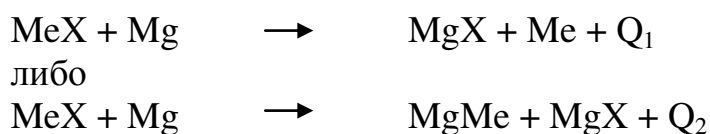
1. Sidorov Yu.G., Dvoretzky S.A., Mikhailov N.N., Yakushev M.V., Varavin V.S., Vasiliev V.V., Suslyakov A.O., Ovsyuk V.N. Proc. SPIE, v. 4355, p. 228 (2001).
2. V.V. Vasiliev, V.N. Ovsyuk, Yu. G. Sidorov. Proc. SPIE, v. 5065, p. 39 (2001)
3. F.F. Sizov, V.V. Vasiliev, D.G. Esaev, V.N. Ovsyuk, Yu.G. Sidorov, V.P. Reva, A.G. Golenkov, V.V. Zabudsky and J.V. Gumenjuk-Sychevskaya. Opto-Electron. Rev., **9**(4), 391 (2001).
4. Варавин В.С., Дворецкий С.А., Костюченко В.Я., Овсяк В.Н., Протасов Д.Ю. ФТП, 2004, том 38, вып. 5, С. 532-537
5. Кучис Е.В. *Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования* (М., Радио и связь, 1990)

© В.Я. Костюченко, Д.Ю. Протасов, 2005

НОВЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В МАГНИЕТЕРМИИ

Магнийтермия – подотрасль цветной металлургии, занимающаяся решением комплекса вопросов, связанных с получением различных металлов, сплавов, химических соединений путем восстановления магнием оксидов, хлоридов, фторидов и других более сложных веществ и изучением их свойств, кинетики и механизма реакций.

Магнийтермический процесс схематично можно изобразить следующим образом:



Магний – перспективный восстановитель не только по причине большого химического сродства к кислороду и другим неметаллам, но и по запасам. Содержание его в земной коре примерно равно 2,1%.

В связи с тем, что в последние десятилетия научились получать сравнительно дешевый и чистый магний, как в виде чушек, так и порошка возросло его применение как восстановителя (30/50% в экономически развитых странах).

Хотя термодинамически магний является хорошим восстановителем почти всех оксидов, так как образование MgO сопровождается наибольшей убылью свободной энергии, однако для успешного хода магнийтермического процесса необходим определенный тепловой эффект реакции, который часто называют термичностью, достаточный для расплавления компонентов шихты и продуктов реакции.

Целесообразность применения магнийтермии к той или другой группе исходных веществ находится, кроме того, в прямой зависимости с типом химического взаимодействия магния с восстанавливаемым элементом.

Нами было показано [1 – 7], что получать магнийтермическим путем относительно чистый металл или металлид возможно в достаточно ограниченном количестве систем. Гораздо чаще при этом получается сплав восстанавливаемого элемента с избытком магния или смесь нескольких трудноразделимых фаз.

Уже к 70м годам прошлого века в промышленности были реализованы магнийтермические способы получения бериллия, титана, циркония, гафния, бора, урана. Все эти элементы, за исключением бора, получаются из соответствующих галогенидов.

Пожалуй, больше всего за последние годы было опубликовано работ по металлургии титана.

Способ Кролля, предложенный в 1940 году в США и существенно модернизированный в СССР, основанный на восстановлении магнием четырех – хлористого титана, позволил нашей стране выйти на одно из первых мест в мире по его производству.

Работы в области совершенствования магниетермии титана продолжаются и сейчас как у нас, так и за рубежом и направлены на создание экономичных непрерывных способов [8].

С точки зрения экономики, интерес представляет, в том числе и работы, ведущиеся с 1997 года в Кэмбриджском университете Соединенного Королевства, где разрабатывается процесс получения титановой губки (не из солей титана, а из его оксида TiO_2). Процесс назван «FFC - Cambrige», ведется в электролизной ячейке с графитовыми анодами в расплаве CaCl_2 при температуре около 900°C .

Оценочная стоимость титановой губки, полученной с использованием нового процесса примерно в 3,5 раза меньше, чем по процессу Кроля [9].

Метод магниетермии может быть использован и для получения металлов и сплавов, в состав которых магний не входит, то есть используется в процессе только как восстановитель.

Нами уже описывались результаты работ по синтезу боридов, нитридов, силицидов, фосфидов, а также карбида бора, гидрида циркония и некоторых сплавов [1].

В последние годы проведен ряд интересных работ по синтезу карбида и карбонитрида титана [10, 11].

Карбид, нитрид и карбонитрид титана находят широкое применение в изделиях специального назначения, как в общем машиностроении, так и в ядерной, химической, аэро - и космической областях.

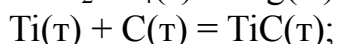
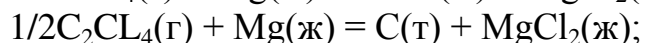
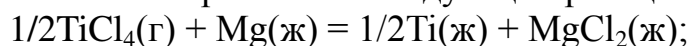
Карбонитрид титана по сравнению с карбидом титана является более перспективным материалом при использовании в инструментах и специальных изделиях из-за большой прочности, химической стабильности при высоких температурах и абразивной износостойкости.

Традиционные методы порошковой металлургии для получения этих веществ менее перспективны, чем предложенные в работах [10,11]. Несомненным достоинством этой технологии, основанной на восстановлении хлоридов титана и углерода магнием, является возможность применения промышленной технологии и аппаратуры для магниетермического производства губчатого титана.

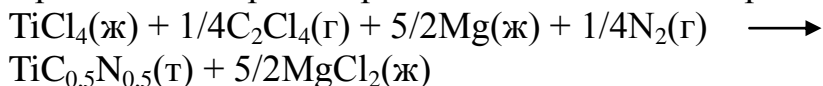
Исходная смесь $\text{TiCl}_4\text{-C}_2\text{Cl}_4$ подавалась в реактор с расплавленным магнием при температуре $850 - 950^\circ\text{C}$.

Процесс вели в среде аргона при синтезе карбида титана или азота – при получении карбонитрида титана.

Возможно протекание следующих реакций:



При синтезе карбонитрида титана возможно протекание основной реакции:



В этой же работе [10] было показано, что при магниетермическом получении керметов TiC/Me (Me – металл – связка) перспективно получение композиционного материала TiC/Ni, являющегося популярным керметом.

Синтез осуществляли восстановлением смеси $TiCl_4 - C_2Cl_4$ сплавом магний – никель. Окончательное формирование композита TiC/Ni происходило на завершающей стадии процесса вакуумной сепарации.

Применение в качестве восстановителя смеси хлоридов титана и углерода магниевых сплавов МЛ5 и алюминиевого сплава АМг61 позволило получить композиционный материал, представляющий собой металлическую матрицу с равномерно распределенными упрочняющими частицами карбида титана.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самсонов Г.В., Перминов В.П. Магниетермия. – М.: Металлургия. 1971– 174с.
2. Перминов В.П., Неронов В.А. Магниетермическое внепечное получение бора из борного ангидрида//Порошковая металлургия.–1969.–№1.С.1– 5.
3. Перминов В.П., Неронов В.А. Магниетермическое внепечное получение молибдена из молибденового ангидрида//Изв. СО АН СССР. Сер. хим. 1969. вып. 5. №12. с.72 – 77.
4. Перминов В.П. Магниетермический способ получения и некоторые свойства сплавов Co – Mg и Ni – Mg. ЖПХ. 1970. Т. XLIII. с. 62 – 65.
5. Перминов В.П. Магниетермическое получение металлов и сплавов. В кн.: Металлотермические процессы в химии и металлургии. Матер. конф. Новосибирск: Наука. 1971. с. 111 – 115.
6. Перминов В.П., Неронов В.А. К вопросу получения бора из буры. В кн. теория и технология металлургических процессов. Новосибирск. Наука. 1974. с. 209 – 213.
7. Перминов В.П., Неронов В.А. Мегниетермическое внепечное получение вольфрама из вольфрамового ангидрида. В кн. Теория и технология металлотермических процессов. Новосибирск. Наука. 1974. с. 207 – 209.
8. Тарасов А.В. Металлургия титана. – М.: Академкнига. 2003. с. 327.
9. Karpel S. Metals Bull Mon. 2003. №391. с. 18 -20.
10. Александровский С.В. Магниетермия тугоплавких соединений титана и композиционных материалов на их основе//Цвет. мет. 2003. №7. с. 116 – 121.
11. Александровский С.В., Сизяков В.М., Ли Д.В. Особенности мегниетемического синтеза ультрадисперсных порошков карбонитридов титана//Цвет. мет. 2003. №10. с. 30 – 34.

© В.П. Перминов, 2005

РАСЧЕТ ГОЛОГРАММНЫХ ЛИНЗ НА ОСНОВЕ ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВОЙ МОДЕЛИ (ЧАСТЬ 1)

Возрастающий интерес к применению голограммных линз связан с возможностью их применения в тех участках инфракрасной и ультрафиолетовой областей спектра, где проблематично применение линз и зеркал [1-2]. Важной составной частью расчета голограммных линз является расчет их схемы записи. Если абберационный расчет голограммных линз может быть выполнен с использованием компьютерных программ [3], то предварительный выбор оптимальной схемы записи голограммных линз лучше сделать с помощью их зеркально-линзовых моделей [4]. Особенно это касается вакуумной ультрафиолетовой области спектра, где голограммные линзы представляют собой, как правило, объемные голограммные элементы. Целью настоящего сообщения является расчет схем записи голограммных линз на основе их зеркально-линзовых моделей.

На рис. 1а и 1б представлены схема записи и схема восстановления голограммных линз. Точечные источники опорной z_r , объектной z_o волн (рис. 1а), восстанавливающей z_c и восстановленной z_i волн (рис. 1б), расположены на оптической оси Oz . В общем случае, длины волн λ_c , λ_o , средние показатели преломления n_c , n_o и толщины голографической среды на стадии восстановления и записи различаются.

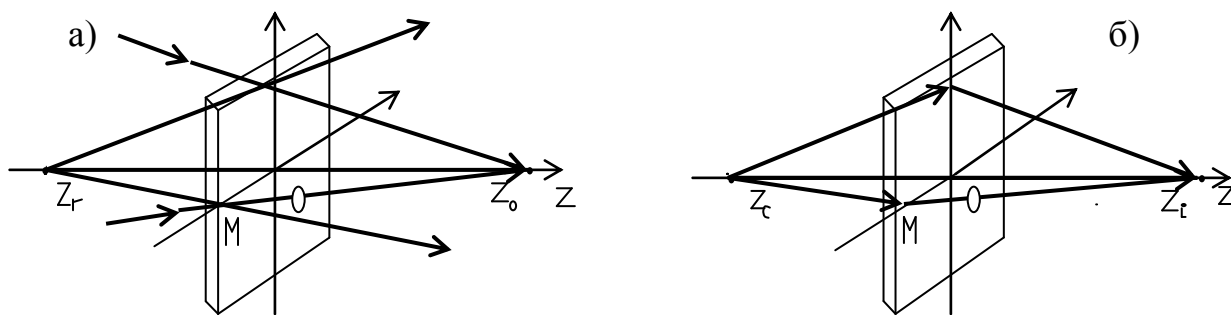


Рис. 1. Схема записи (а) и восстановления (б) объемного осевого ГОЭ

Согласно зеркально-линзовой модели голограммные линзы можно представить в виде комбинации тонкой линзы и отражающего сферического зеркала. Аналитически эта модель описывается формулами [4]

$$\begin{aligned} 1/z_c - 1/z_i &= k\mu(1/z_r - 1/z_o)/m_r^2 = 1/F_1, \\ 1/z_c + 1/z_i &= (1/z_r + 1/z_o)/m_z. \end{aligned} \quad (1)$$

где k – порядок дифракции, m_r – коэффициент усадки в плоскости голографической среды, m_z – коэффициент усадки вдоль оси Oz , μ – отношение длин волн восстановления и записи ($\mu = n_o\lambda_c/n_c\lambda_o$), F_1 – фокусное расстояние.

Если же голограммные линзы представляют собой зонную пластинку Френеля, то формулы их зеркально-линзовых моделей имеют вид [5]

$$\begin{aligned} 1/z_r - 1/z_o &= (1/z_c \pm 1/z_i)m_r^2/k\mu, \\ 1/z_r + 1/z_o &= [(-1/3 + 4k^2\mu^2/3m_r^2 \pm 4k^2\mu^2F^2/m_r^2z_iz_c)^{1/2} \pm 1]m_r^2/k\mu. \end{aligned} \quad (2)$$

В формулах (2) верхний знак плюс соответствует рельефным (киноформным), а нижний знак минус – тонким зонным пластинкам.

Решая систему (1) относительно $1/z_r$, $1/z_o$, получаем

$$\begin{aligned} 1/z_r &= m_r^2(P_c + 1)/2k\mu F_i, \\ 1/z_o &= m_r^2(P_c - 1)/2k\mu F_i, \end{aligned} \quad (3)$$

где параметр $P_c = \pm \mu m_z(z_i/z_c + 1)/m_r^2(z_i/z_c - 1)$.

Решая систему (2) относительно $1/z_r$, $1/z_o$, получаем

$$\begin{aligned} 1/z_r &= [(-1/3 + 4k^2\mu^2/3m_r^2 \pm 4k^2\mu^2F^2/m_r^2z_iz_c)^{1/2} + 1]m_r^2/2k\mu F, \\ 1/z_o &= [(-1/3 + 4k^2\mu^2/3m_r^2 \pm 4k^2\mu^2F^2/m_r^2z_iz_c)^{1/2} - 1]m_r^2/2k\mu F. \end{aligned} \quad (4)$$

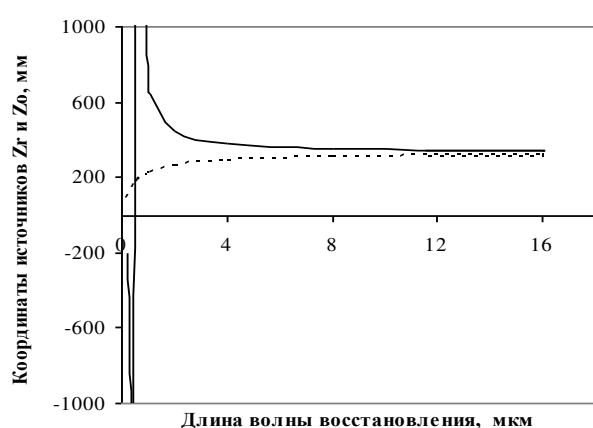


Рисунок 2. Координата Z_r источника референтной волны – ряд 1, координата Z_o источника объектной волны – ряд 2.

..... Ряд1 — Ряд2

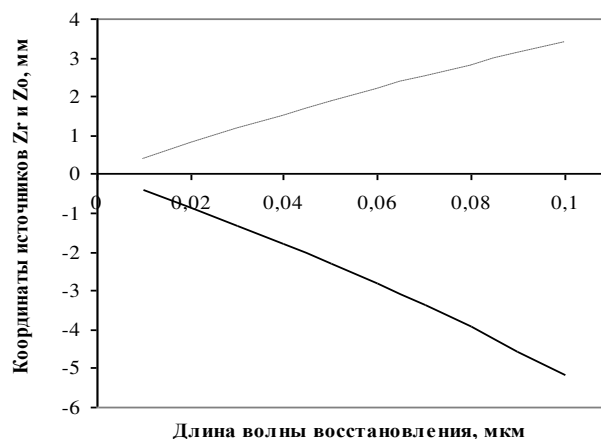


Рисунок 3. Координата Z_r источника референтной волны – ряд 1, координата Z_o источника объектной волны – ряд 2.

—— Ряд1 — Ряд2

Формулы (3), в отличие от формул (4), позволяют выполнить расчеты в более широкой области спектра. Расчеты по формуле (3) для голограммных линз инфракрасной и ультрафиолетовой областей спектра представлены в виде графиков на рис. 2-9. На рис. 2-5 приведены результаты расчетов зависимостей координат источников z_r , z_o опорной и объектной волн от длины волны восстановления и записи. В качестве примера рассматриваются голограммные линзы для инфракрасного ($\lambda_c=10$ мкм) и вакуумного ультрафиолетового ($\lambda_c=50$ нм) диапазонов спектра. В интересующей нас инфракрасной области спектра (с длиной волны более 4 мкм), зависимости носят практически линейный характер (рис. 2). Также линейная зависимость положений источников волн при записи наблюдается для голограммных линз и в ультрафиолетовой области спектра (рис. 3). Что касается выбора длины волны λ_o записи, то зависимость от λ_o положений источников при записи голограммной линзы для инфракрасной области спектра линейна (рис. 4). Зависимость от длины волны записи λ_o

голограммной линзы для вакуумного ультрафиолетового спектра носит уже нелинейный характер (рис. 5).

На рис. 6-9 представлены расчетные зависимости координат источников опорной и объектной от величины фокусного расстояния и коэффициента линейного увеличения голограммных линз. В интересующих нас участках спектра эти зависимости носят линейный характер. На представленных рис. 3, 5, 7, 9 координаты источников волн имеют разные знаки. Это означает, что одна из волн является расходящейся, а другая – сходящейся. Для инфракрасной области спектра координаты источников имеют одинаковые знаки (рис. 2, 4, 6, 8), поэтому в схеме записи обе волны являются расходящимися или сходящимися.

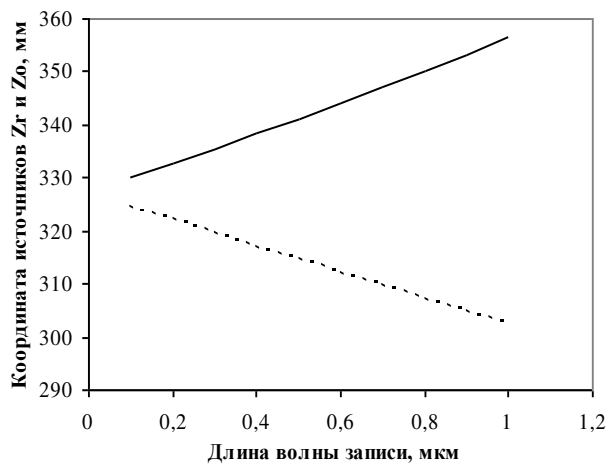


Рисунок 4. Координата Z_r источника референтной волны - ряд 1, координата Z_o источника объектной волны - ряд 2.
..... Ряд1 — Ряд2

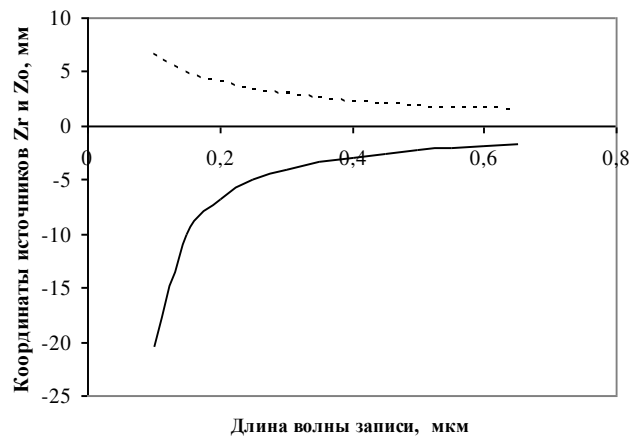


Рисунок 5. Координата Z_r источника референтной волны - ряд 1, координата Z_o источника объектной волны - ряд 2.
..... Ряд1 — Ряд2

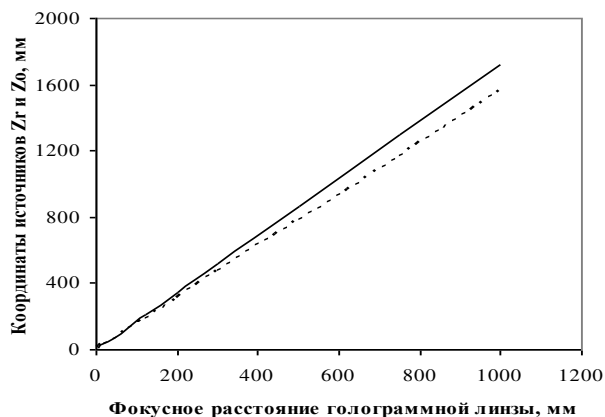


Рисунок 6. Координата Z_r источника референтной волны - ряд 1, координата Z_o источника объектной волны - ряд 2.
..... Ряд1 — Ряд2

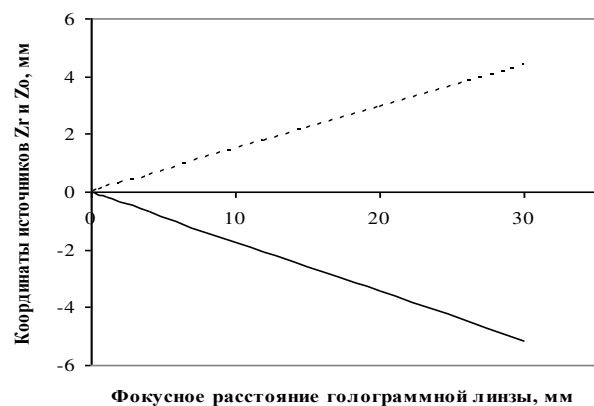


Рисунок 7. Координата Z_r источника референтной волны - ряд 1, координата Z_o источника объектной волны - ряд 2.
..... Ряд1 — Ряд2

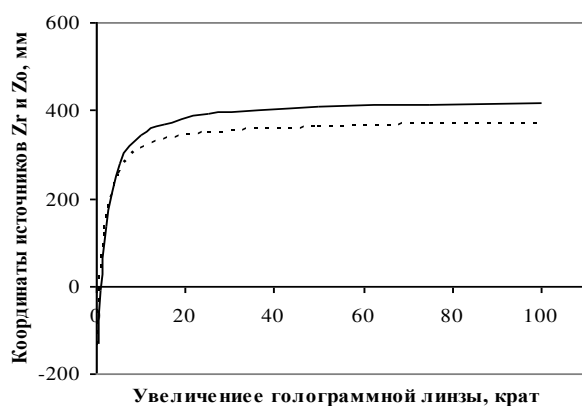


Рисунок 8. Координата Z_r источника референтной волны - ряд 1, координата Z_o источника объектной волны - ряд 2.
 Ряд1 — Ряд2

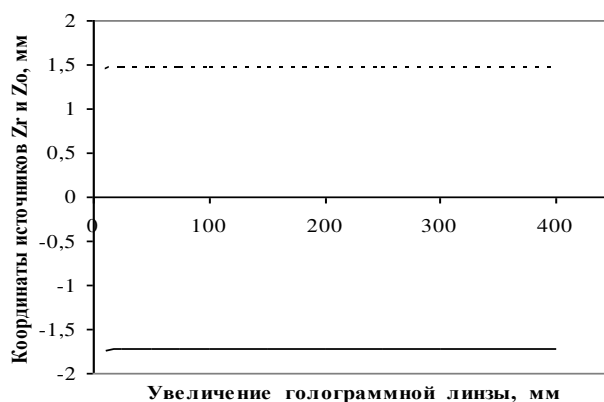


Рисунок 9. Координата Z_r источника референтной волны - ряд 1, координата Z_o источника объектной волны - ряд 2.
 Ряд1 — Ряд2

Таким образом, результаты расчетов указывают на существенную разницу схем записи голограммных линз для инфракрасной и ультрафиолетовой областей спектра.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рентгеновская оптика и микроскопия [Текст]/ Под ред. Г. Шмаля и Д. Рудольфа // М.: Мир, 1987. – 464 с.
2. Батомункуев Ю.Ц. Аберрации объемных голограмм [Текст]/ Ю. Ц. Батомункуев, Е.А. Сандер, С.А. Шойдин // Тез. Всесоюз. семинара "Автоматизация проектирования опт. систем". – М., 1989. – С.101–112.
3. Ган М.А. Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов [Текст]/ М.А. Ган // Л.: ГОИ, 1984. – 140 с.
4. Батомункуев Ю.Ц. Особенности расчета схем записи объемных осевых голографических оптических элементов с неизотропной усадкой [Текст] / Ю. Ц. Батомункуев // Автометрия – 2002. – № 2. – С. 108–114.
5. Батомункуев Ю. Ц. Разработка и расчет объемных голографических оптических элементов [Текст]/ Ю. Ц. Батомункуев // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Новосибирск, 2003. – 184 с.

© Ю.Ц. Батомункуев, 2005

МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Предлагаются результаты расчетов многоспектральных зеркально-линзовых оптических систем с использованием пакета прикладных оптических программ «SYNOPSIS». Для данных объектива и телескопа приводятся принципиальная оптическая схема и распределение энергии в абберрационном кружке (конусе).

Многоспектральный объектив, многоспектральный телескоп, визуальный и тепловизионные диапазоны спектра.

Одной из основных задач по увеличению информационных возможностей оптико-электронных приборов является расширение их рабочего спектрального диапазона. Чередование спектральных диапазонов в процессе работы или получение одновременных изображений в нескольких рабочих диапазонах спектра повышает количество и оперативность получения информации.

Использование единой многоспектральной оптики позволяет снизить весогабаритные характеристики входного оптического устройства, т.е. повысить эксплуатационные возможности оптико-электронной аппаратуры в целом.

В качестве исходной схемы для разработки такого типа устройств, использована схема зеркально-линзового объектива, состоящая из зеркала Манжена и положительного компенсатора в параллельном пучке лучей, выполненных из одного оптического материала [1]. Такое расположение оптических элементов реализует известный принцип частичной взаимной компенсации хроматических aberrаций.

Используя в качестве материала преломляющих оптических элементов фтористый барий, прозрачный для оптического излучения от 0,15 мкм до 15 мкм, возможно, увеличить рабочий спектральный диапазон объектива от 0,489 мкм до 12 мкм.. Коррекция aberrаций и оценка качества проводилась по поддиапазнам спектра: визуальном – 0,489-0,900 мкм, тепловизионных – 3,5-5,0 мкм и 8,0-12,0 мкм.

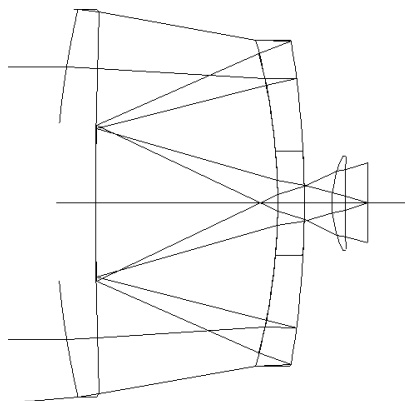


Рис. 1 Оптическая схема объектива

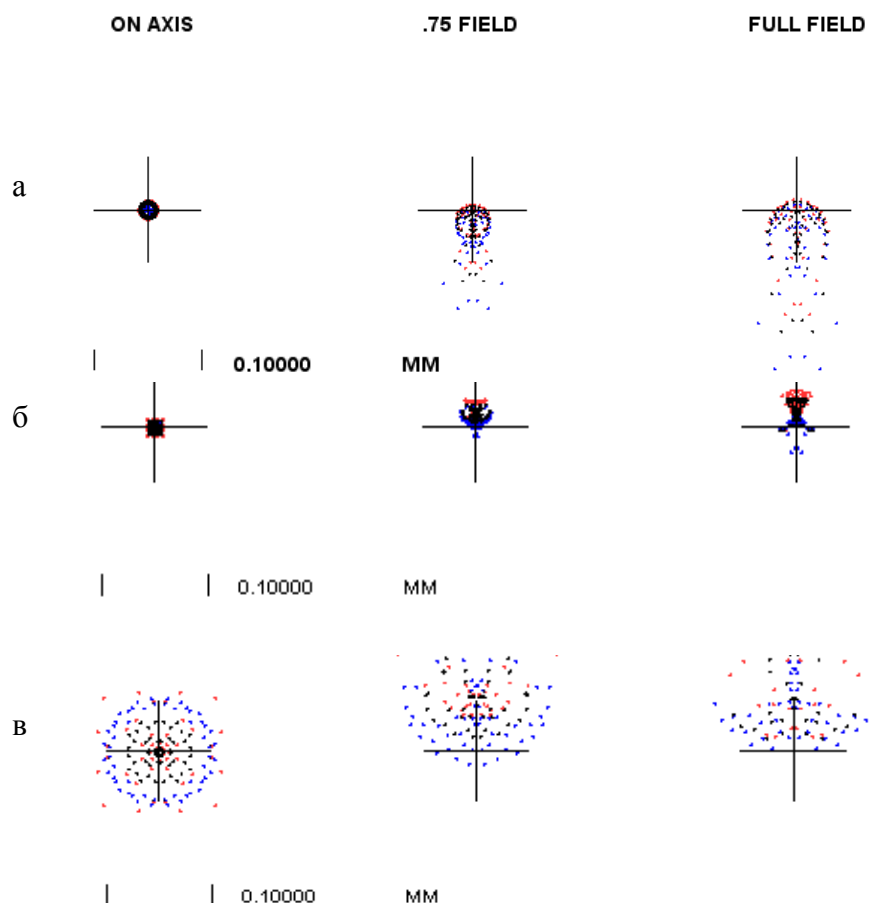


Рис. 2. Распределение энергии в абберационном кружке объектива. Рабочий спектральный диапазон:

а – 0,489-0,9 мкм; б – 3,5-5,0 мкм; в – 8,0 12,0 мкм.

Вторым примером оптической системы является многоспектральный телескоп – афокальная система, служащая для уменьшения светового пучка последующих спектральных каналов. За основу взят телескоп по схеме [2] из одного оптического материала.

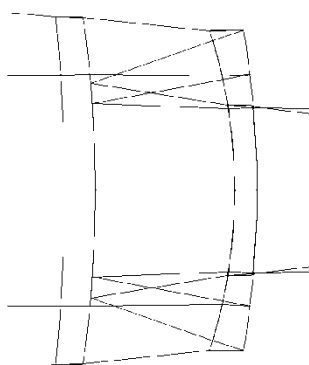


Рис. 3 Оптическая схема телескопической системы

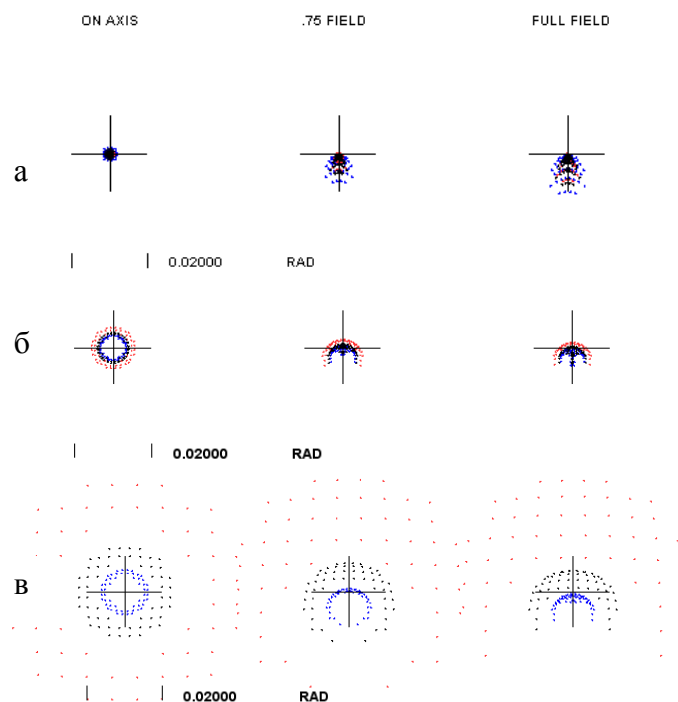


Рис. 4. Распределение энергии в абберационном конусе объектива. Рабочий спектральный диапазон:

а – 0,489-0,9 мкм; б – 3,5-5,0 мкм; в – 8,0 12,0 мкм.

Результаты расчётов показывают принципиальную возможность разработки многоспектральных систем для трёх диапазонов спектра. Размер абберационного кружка увеличивается от длины волны излучения, однако в каждом из поддиапазонов не превышает 10 длин волн и при дальнейшей оптимизации может быть уменьшен.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ефремов В.С. О коррекции хроматизма зеркально линзовых объективов в широкой области спектра// Оптико-механические и оптико-электронные приборы: Межвуз. сб.- Новосибирск: НИИГАиК, 1985.-144-149 с.
2. А.с. 252231 СССР, МКИ 2 G02b 17/08. Мультиспектральный телескоп/В.С.Ефремов (СССР); Заявлено 11.05.86; Оpubл. 1.04.87.

© В.С.Ефремов., 2005

УДК 621.396

Б.В. Поллер, А.В. Бритвин, Е.В. Удальцов

ИЛФ СО РАН, Новосибирск

С.И. Коняев

СГГА, Новосибирск

Ю.И. Щетинин

НГТУ, Новосибирск

О ПРИМЕНЕНИИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ ВНЕ ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ

Лазерные системы широко используются в геодезических задачах по определению расстояний, углов и перемещений объектов. Однако неперенным условием функционирования геодезических лазерных систем является наличие прямой видимости между источником излучения и измеряемым объектом. Вместе с тем для топологической привязки объектов, для определения направления и расстояния до объектов без их прямой видимости может использоваться явление рассеяния лазерного излучения в атмосфере. Впервые работы по использованию лазерных маяков в атмосфере были начаты в восьмидесятые годы прошлого столетия [1]. Экспериментально, на основе рэлеевского рассеяния были созданы лазерные маяки на высотах 6-20 км и с использованием резонансного рассеяния в натриевом слое на высоте 90 км. Эти маяки применялись для исследований по адаптивной оптике. Ряд теоретических вопросов применения загоризонтных лазерных систем для определения координат наземных объектов рассмотрен в работе [2].

Вопросы построения лазерных линий с использованием рассеяния в атмосфере рассмотрены в работах [3, 4]. Остановимся на некоторых экспериментальных результатах полученных нами по характеристикам рассеянных лазерных и широкополосных ультрафиолетовых (УФ) сигналов на трассах до 2 км без прямой видимости между излучателем и фотоприемником.

Общая схема размещения излучателей и приемников представлена на рис. 1, где указаны угловые характеристики излучателей и фотоприемников. При экспериментах с лазерным излучением наблюдалось в основном молекулярное рассеяние в чистой атмосфере в так называемой солнечно-слепой зоне на длинах волн менее 0,29 мкм, где величина фоновой помехи становится минимальной за счет поглощения солнечного УФ излучения озоновым слоем в атмосфере. Величина молекулярного рассеяния обратно пропорциональна четвертой степени длины волны, а индикатрисса рассеяния определяется выражением [4]

$$x(\gamma) = \frac{3}{4} (1 + \cos^2 \gamma).$$

В условиях эксперимента лазерный источник находился вне прямой видимости для приемника (за соседним зданием) и луч направлялся под углом 10 градусов к горизонту. В месте расположения приемника на расстоянии 1 км от источника излучения луч проходил на высоте более 100 метров.. Расходимость луча лазера составляла около 10 минут. Зависимость выходного сигнала приемника от угла поворота (при метеорологической дальности видимости МДВ около 10 км) представлена на рис. 2., там же приведены

расчетные значения сигнала в соответствии с индикатриссой молекулярного рассеяния. Из проведенных экспериментов на трассах до 2,2 км следует, что направление на источник излучения может надежно определяться при отсутствии прямой видимости между излучателем и приемником. При этом точность определения направления на источник излучения зависит от угла поля зрения и типа приемника, так при использовании координатных фотоприемников можно ожидать получение точности до нескольких угловых минут.

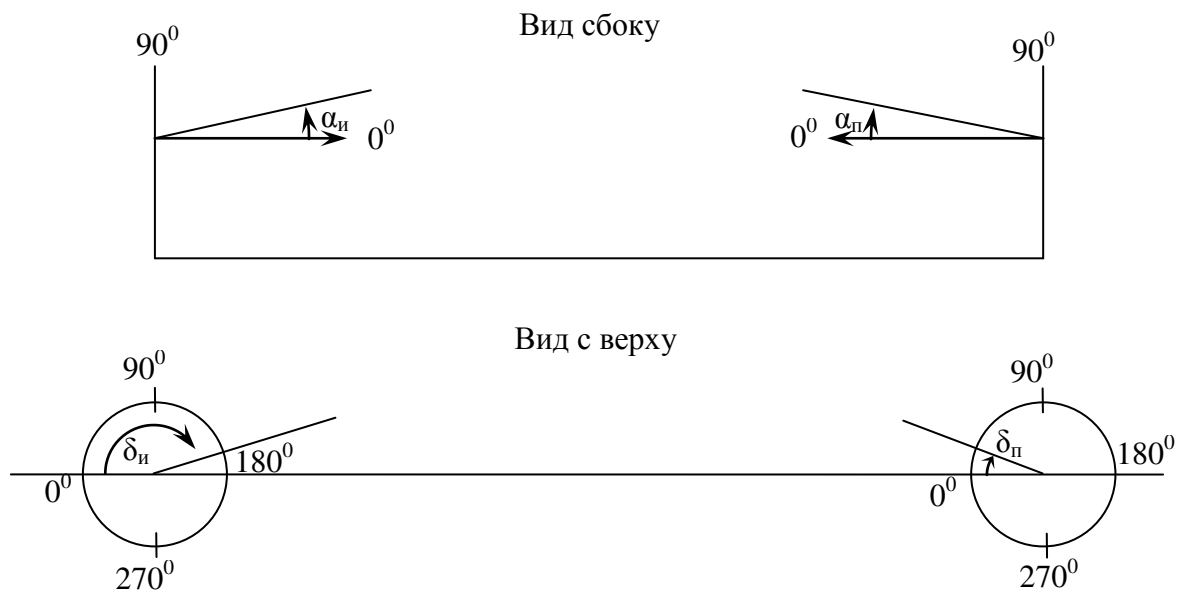


Рис. 1. Схема ориентации приемника и перелатчика

Для проведения полевых испытаний были разработаны компактные и недорогие импульсные источники УФ излучения в области 0,25 - 0,35 мкм с углом расходимости около 1 градуса. Результаты измерений зависимости принятого сигнала от угла поворота приемника в горизонтальной плоскости на трассе 1600 м. представлены на рис. 3. . Измерения производились в условиях слабого снегопада с МДВ около 3 км.

Из рис. 2 и 3. следует, что для УФ диапазона определяющее влияние на рассеяние составляет молекулярное рассеяние при МДВ более 3 км. При появлении аэрозольного рассеяния, можно ожидать более вытянутую индикатриссу рассеяния [5] и в свою очередь увеличения точности определения направления на источник излучения.

Представляет также интерес возможность определения расстояния от приемника до такого невидимого УФ излучателя. Первая возможность связана с синхронизацией источника УФ излучения и приемника внешним высокостабильным импульсным генератором, что соответственно позволит определить время распространения и соответственно расстояние до излучателя. Однако для высокой точности определения расстояния необходимо иметь достаточно короткие лазерные импульсы. Необходимо также учитывать траекторию распространения лазерного излучения и кратность рассеяния принятых фотонов.

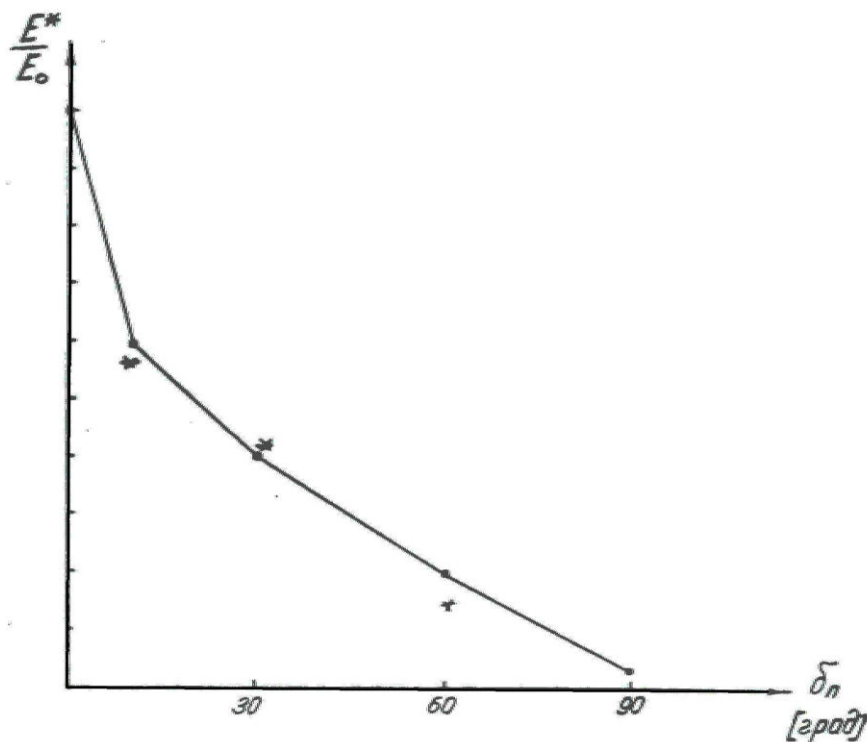


Рис.2 Зависимость E^* от δ_n при $\alpha_{и} = 4^0$, $\delta_{и} = 180^0$, $\alpha_{п} = 0^0$:

• - эксперимент, * - расчет

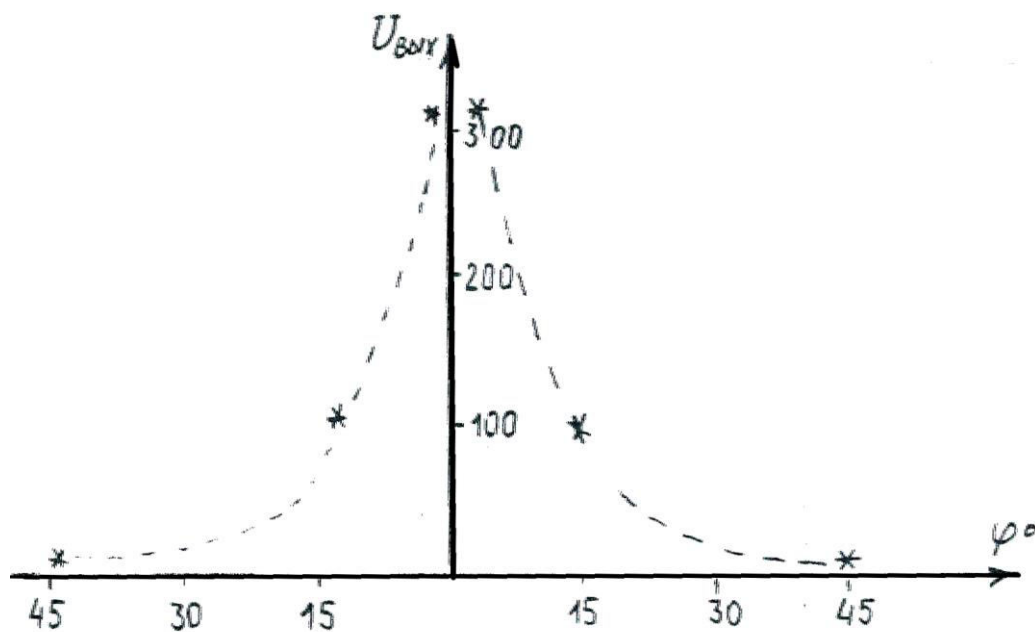


Рис. 3 Зависимость $U_{\text{вых}}$ от угла поворота ФЭУ в горизонтальной плоскости (МДВ>10км) мелкий снег
 $I = 1600\text{м}$

Дополнительную информацию о расстоянии до объекта, где установлен УФ излучатель, можно получить также за счет анализа геометрических характеристик контролируемой зоны рассеяния и величины принятого сигнала. В частности ясно, что при удалении от объекта будет соответственно

увеличиваться эта зона за счет расходимости лазерного пучка, при этом необходимо учитывать угол наклона луча излучателя и поля зрения приемника.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бакут П.А., Камчатов В.Б., Маркина О.М. и др. Искусственные маяки в адаптивных оптических системах. Заруб. радиоэлектроника, 4, 1995.
2. Павлов В.Г., Проскурин Н.Г., Сидоров Ю.В., Толстых Н.Н. Оценка возможности применения лазерных загоризонтных систем для определения координат наземных объектов. Труды 7 Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация и связь», Воронеж, ВГУ, 2001, том 2, с.1246 – 1252.
3. Багаев С.Н., Беляков В.Г., Поллер Б.В. Методы построения лазерных сетей связи в атмосфере с аэрозолями. Труды научно-технической конференции «Радио и волоконно-оптическая связь, локация и навигация», Воронеж, ВГУ, 1997, том 3, с.1126 – 1237.
4. Поллер Б.В., Федоров Б.В., Щетинин Ю.И. Об эффективности передачи сообщений в атмосферных оптических каналах связи с рассеянием. Труды международной НТК «Радиолокация, навигация, связь» Изд-во НПФ «Саквояж» Воронеж, 2003 г. Т.1. с.403 – 406.
5. Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. и др. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. Наука, Новосибирск, 1986.

© Б.В. Поллер, А.В. Бритвин, С.И. Коняев, Ю.И.Щетинин, Е.В. Удальцов, 2005

УДК 681.327

В.В. Малинин

СГГА, Новосибирск

СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ РАЗМЕРАМИ ФАЙЛА ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ И ПАРАМЕТРАМИ ПЕРИФЕРИЙНЫХ УСТРОЙСТВ

Разрешающая способность и размер изображения на экране монитора

Размерность экрана монитора, обычно, дается в виде произведения пары чисел, которые указывают ширину и высоту экрана в пикселах. Размер экрана определяется его диагональю в дюймах. Размер изображения на экране зависит от значения разрешающей способности экрана: количество пикселей на дюйм ширины экрана (n/d). В табл. 1 показана зависимость разрешающей способности в n/d (белые числа) от размерности и от размера экрана монитора.

Исторически со времен первых компьютеров фирмы Apple было принято, что текст на экране монитора хорошо различается при разрешающей способности в 72 n/d . Как видно из табл. 1, реальное значение разрешающей способности отличается от 72 n/d , но не намного. Следует иметь в виду, что при увеличении разрешающей способности размеры объектов на экране уменьшаются, но объекты кажутся более четкими.

Таблица 1. Соотношения между параметрами экрана монитора

Размерность (число пикселей) экрана	Размер экрана				
	14"	15"	17"	19"	21"
640 x 480= 307200	60	57	51	44	41
800 x 600= 480000	74	71	64	56	51
1024 x 768= 786432	95	91	82	71	65

При отображении изображений на экране важно, что бы наблюдатель был способен видеть полное изображение без его прокрутки или листания. Чтобы

гарантировать это, дизайнеры веб-страниц часто предполагают, что самое низкое разрешение обычного дисплея составляет 640x480. По этой причине, для большинства изображений, которые посылаются электронной почтой или отправляются на удаленный экран, устанавливают размерность не более 600x400 пикселей.

Таблица 2. Расчет размеров изображения на экране

Обозначение	Параметры изображения и экрана	Единица измерения	Пример	Формула	Результат
W_{di}	Ширина цифрового изображения	Пиксел	800	-	-
H_{di}	Высота цифрового изображения	Пиксел	480	-	-
W_s	Ширина экрана	Дюйм	14	-	-
R_{hs}	Ширина экрана	Пиксел	800	-	-
RR_s	Разрешающая способность	пнд	-	R_{hs} / W_s	57
W_{is}	Ширина изображения на экране	Дюйм	-	R_{hs} / RR_s	14
H_{is}	Высота изображения на экране	Дюйм	-	H_{di} / RR_s	8
fit	Изображение вписывается в экран	Да/ Нет	-	W_{di} / R_{hs}	Да

Разрешающая способность принтера и сканера

Разрешающая способность принтера и сканера, обычно, определяется числом точек на дюйм (m/d) или линий на миллиметр ($лн/мм$), которые они печатают или сканируют. Значение разрешающей способности для струйных принтеров доходит до 1700 m/d , а для коммерческих печатных машин это значение колеблется в диапазоне от 1000 до 2400 m/d .

Таблица 3. Расчет размеров отпечатка

Обозначение	Параметры изображения и принтера	Ед. изм.	Пример	Формула	Результат
W_{di}	Ширина цифрового изображения	Пиксел	1 600	-	-
H_{di}	Высота цифрового изображения	Пиксел	1 200	-	-
RR_p	Разрешающая способность принтера	Тнд	300	-	-
W_p	Ширина изображения на отпечатке принтера	Дюйм	-	W_{di} / RR_p	5,33
H_p	Высота изображения на отпечатке принтера	Дюйм	-	H_{di} / RR_p	4,00

Таблица 4. Расчет высоты отпечатка

Обозначение	Параметры изображения и принтера	Ед. изм.	Пример	Формула	Результат
W_{di}	Ширина цифрового изображения	Пиксел	1 600	-	-
H_{di}	Высота цифрового изображения	Пиксел	1 200	-	-
W_{pd}	Заданная ширина отпечатка	Дюйм	6	-	-
H_p	Искомая высота отпечатка	Дюйм	-	$(W_{pd} * H_{di}) / W_{di}$	4,5
RR_{pd}	Требуемая разрешающая способность	тнд	-	W_{di} / W_{pd}	267

На оптимальной дистанции (25 .. 30 см) человек с нормальным зрением может различать до 10 отдельных точек на миллиметре. Примерно, это составляет 250 точек на дюйм. Чтобы не различались отдельные пикселы (пикселизация), разрешение изображения для *печати* должно составлять 300 точек на дюйм (*т/д*). Для излучающего источника (например, экран монитора) достаточно разрешения 72 *т/д*, чтобы не наблюдалась пикселизация. С увеличением расстояния до изображения разрешающая способность зрения падает. Поэтому, например, настенные распечатки могут иметь вдвое меньшее разрешение, чем распечатки в книге или отчете.

Цветовая глубина

Чтобы вычислить цветовую глубину, достаточно возвести двойку в степень числа битов, используемых для записи или отображения изображения. В табл. 7 показаны основные варианты.

Таблица 5. Цветовые глубины

Цветность	Битов на пиксел	Формула	Цветовая глубина
Черно-белый	1	2^1	2
Цветной дисплей Windows	4	2^4	16
Шкала серого из 256 оттенков	8	2^8	256
Цветная шкала из 256 цветов	8	2^8	256
Высококачественное цветовоспроизведение	16	2^{16}	65 000
Истинный цвет	24	2^{24}	16 000 000
Супервыборка	30	2^{30}	1 024 000 000

В цветных сканерах создаются отдельно красный, зеленый и синий варианты изображения, а затем они сливаются вместе, чтобы создать результирующее цифровое изображение. Некоторые сканеры сканируют все

цвета за один проход, а другие делают три прохода: медленно, но с лучшим качеством. Какой метод используется, зависит от датчика изображения сканера. В большинстве сканеров используется линейка ПЗС. В тех сканерах, где требуются три прохода, используется одна линейка, и устанавливаются различные фильтры (красный, зеленый или синий) перед датчиком для каждого прохода или используются три различных источника света. В других сканерах имеется 3 строки фотоячеек, каждая строка с ее собственным фильтром, так что они могут снимать все три цвета за один проход.

Таблица 6. Расчет цветовой глубины

Обозначение	Параметры изображения	Ед. изм.	Пример	Формула	Результат
CD	Цветовая глубина	Бит/пиксел	24		
N_{pc}	Количество возможных цветов			2^{24}	16 777 216
W_{di}	Ширина цифрового изображения	Пиксел	1 600		
H_{di}	Высота цифрового изображения	Пиксел	1 200		
N_p	Количество пикселей	Пиксел		$W_{di} * H_{di}$	1 920 000
FS_u	Размер файла без сжатия	бит		$(W_{di} * H_{di}) * CD$	46 080 000
		Байт		$FS_u / 8$	5 760 000

Во время сканирования изображения источники света движутся вниз над фотографией (в некоторых сканерах, вместо этого, перемещается документ мимо источника света). Световые лучи отражаются от оригинала или проходят сквозь прозрачную пленку и фокусируются на датчике изображения системой из объектива и зеркала. Благодаря этой системе зеркало-объектив, датчик может быть уже просматриваемой области.

Горизонтальная оптическая разрешающая способность сканера определяется числом фотоячеек в его датчике. Однако, вертикальная разрешающая способность определяется шагом передвижения носителя оригинала или источника света между сканированиями строк. Например, сканер с размерностью 600x1200 имеет 600 фотоячеек в датчике и шаг перемещения 1/1200 дюйма.

Сканирование изображения для печати с заданными размерами

В большинстве случаев достаточно иметь разрешение печати, приблизительно, 300 точек на дюйм, чтобы получить фотоотпечаток с приемлемым уровнем качества. Это означает, что для отпечатка 4 x 6 дюйм требуется файл изображения 1200 x 1800, а для отпечатка 8 x 10 дюйм требуется файл изображения 2400 x 3000. Но если задан размер отпечатка, то требуется вычислить каким должен быть размер файла изображения. Изображение нужно сканировать так, чтобы при печати число точек на дюйм вдвое превышало число линий на дюйм ($лн/д$).

Таблица 7. Сканирование изображения для печати с заданными размерами

Обозначение	Параметры изображения и принтера	Ед. изм.	Пример	Формула	Результат
H_p	Размер отпечатка по горизонтали	Дюйм	12		
V_p	Размер отпечатка по вертикали	Дюйм	8		
RR_p	Разрешающая способность отпечатка	т/д	300		
H_{sp}	Размер оригинала по горизонтали	Пиксел		$RR_p * H_{sp}$	3 600
V_{sp}	Размер оригинала по вертикали	Пиксел		$RR_p * V_{sp}$	2 400
CD	Цветовая глубина	Бит	24		
S_f	Размер файла	бит		$(H_{sp} * V_{sp}) * C$ D	207 360 000
		байт		$S_f / 8$	25 920 000

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мураховский В. И., Симонович С.В. Секреты цифрового фото. – СПб: Питер, 2005. – 144 с.
2. Curtin D.P. A short course in pixels displaying, printing, and scanning digital images. – www.startcourses.com © В.В. Малинин, 2005

© В.В. Малинин, 2005

ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ И СКОРОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Регистрация ультрафиолетового (УФ) излучения в области 0,2 – 0,38 мкм представляет большой интерес для построения систем, как для приема информации, так и для определения координат и скорости УФ излучателя. Анализ методов построения приемников для УФ диапазона выполнен в [1], в том числе рассмотрены методы построения Уф приемников на полимерных пленках с р – n переходами. Однако все эти приемники имеют малую апертуру.

Во многих случаях необходим прием УФ излучения на больших площадях, например, при регистрации сигнала от подвижного УФ излучателя. Для этого предлагается использование размещения специальных люминофоров в полимерных планарных и волоконных волноводах – люминесцентные волноводные преобразователи спектра (ЛВПС) [2,3].

Рассмотрим временные и энергетические характеристики ЛВПС. Полную мощность излучения люминесценции внутри ЛВПС можно оценить как [4]:

$$P_L = S_{ЛВПС} B_{кв} \frac{\bar{\nu}_L}{\bar{\nu}_n} \int I_n(\nu) (1 - 10^{-C\varepsilon(\nu)l}) d\nu \quad (1)$$

$$\frac{\bar{\nu}_L}{\bar{\nu}_n} = \frac{\int P_L(\nu) d\nu}{\int \frac{P_L(\nu)}{\nu} d\nu}, \quad \frac{\bar{\nu}_L}{\bar{\nu}_n} = \frac{\int S_{ЛВПС} I_n(\nu) (1 - 10^{-C\varepsilon(\nu)l}) d\nu}{\int \frac{S_{ЛВПС} I_n(\nu) (1 - 10^{-C\varepsilon(\nu)l})}{\nu} d\nu},$$

где l – расстояние проходимое падающим излучением в ЛВПС, $\bar{\nu}_n$, $\bar{\nu}_L$ – эффективные средние частоты поглощаемого и излучаемого света, $I_n(\nu)$ – спектральная интенсивность падающего излучения, $S_{ЛВПС}$ – площадь поверхности ЛВПС, C – концентрация люминофора, $\varepsilon(\lambda)$ – спектральный коэффициент экстинкции. Чтобы в рабочем диапазоне длин волн происходило полное поглощение излучения, необходимо, выполнение условия $l \gg 1/C\varepsilon(\lambda)$. Тогда (1) можно упростить:

$$P_L = S_{ЛВПС} B_{кв} \frac{\bar{\nu}_L}{\bar{\nu}_n} \int I_n(\nu) d\nu \quad (2)$$

В (1) и (2) не учитывается поглощение падающего излучения материалом волновода. Поглощение в современных чистых материалах может быть менее 1 дБ/км [5], а размеры ЛВПС ограничены несколькими метрами. Материал волновода должен быть прозрачен как для принимаемого излучения, так и для излучения люминесценции, и, при необходимости, может так же служить оптическим фильтром, например, отсекал коротковолновую часть спектра поглощения люминофора. Оболочка необходима для защиты ЛВПС от внешних воздействий.

В ЛВПС преобладают потери, связанные с неполным сбором излучения люминесценции волноводом, поглощением излучения люминесценции самим люминофором, френелевские потери [4]. Потери на френелевское отражение от поверхности ЛВПС (оболочки и волновода) учитывается соответствующим уменьшением $I_n(\nu)$ в (1) или (2) и в области длин волн 0,25 – 0,35 мкм могут достигать 4-7,5 %.[6]

Потери, связанные с поглощением излучения люминесценции самим люминофором, возникает вследствие перекрытия его спектров поглощения и люминесценции (эффект “внутреннего фильтра”) [7]. Расчеты показывают, что наибольшее поглощение люминофором излучение люминесценции испытывает на первых сантиметрах пути в ЛВПС (см. рис. 1) [4]. Потери сильно зависят от степени перекрытия спектров поглощения и люминесценции люминофора и могут достигать 10 и более дБ при $l = 1$ м.

Поэтому для построения ЛВПС с большой площадью необходимо выбирать люминофор с наименьшим перекрытием спектров поглощения люминесценции.

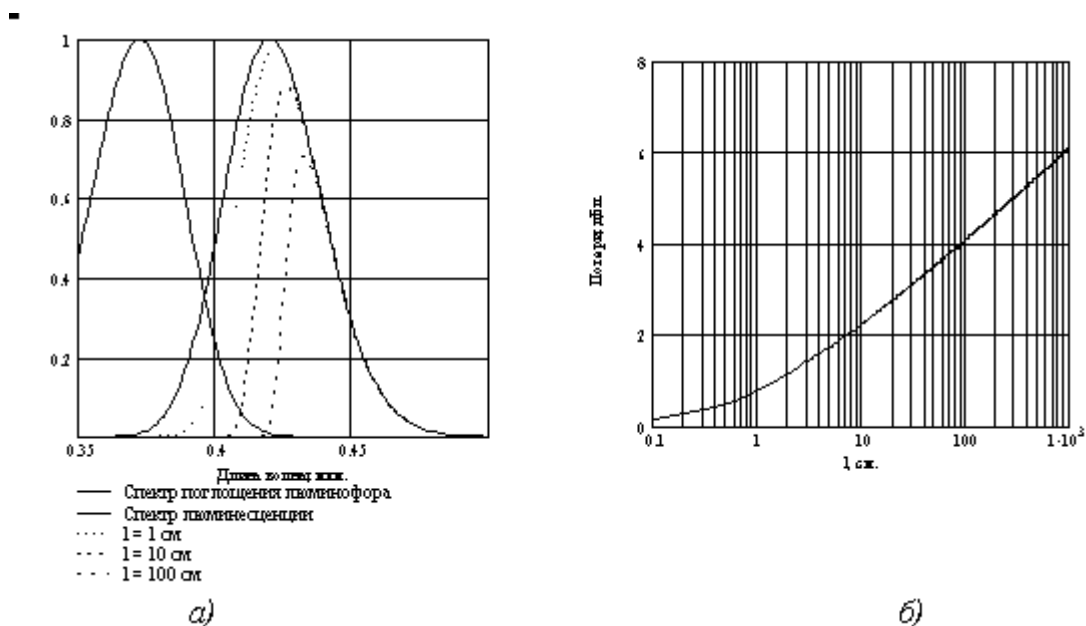


Рис. 1. Искажение спектра люминесценции и потери при перепоглощении излучения люминофором (l – длина пробега излучения люминесценции в ЛВПС)

Потери, связанные с неполным сбором излучения люминесценции, определяются конструкцией ЛВПС и критическим углом скольжения в волноводе $\theta_c = \arccos(n_o/n_v)$, где n_v и n_o – показатели преломления материалов волновода и оболочки соответственно [4].

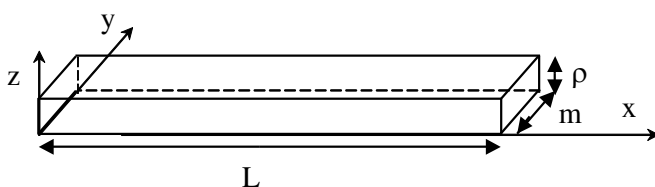


Рис. 2. Вид планарного ЛВПС (ρ, m, L - размеры пластины)

Простейший вид волновода ЛВПС – планарный (см. рис. 2). Принимаемое излучение попадает в волновод через поверхность $z = \rho$, параллельно

оси z. Излучение люминесценции направляется волноводом вдоль оси x. Приемники излучения располагают в плоскостях $x = 0$ и $x = L$. Мощность излучения люминесценции выходящего через один торец волновода (например, в плоскости $x = 0$) можно оценить как [4]

$$P_L = \frac{m}{4\pi} B_{\kappa\psi} \frac{\bar{v}_L}{v_n} \int I_n(\nu) (1 - 10^{-C\varepsilon(\nu)\rho}) d\nu \cdot \int_{0-\theta_c}^L \int_{-\theta_c}^{\theta_c} \cos(\theta) \cdot e^{-\frac{\alpha(x) \cdot x}{\cos(\varphi) \cos(\theta)}} d\varphi \cdot d\theta \cdot dx, \quad (3)$$

где n_b и n_o – показатели преломления материалов волновода и оболочки, $\alpha(x)$ – суммарные потери излучения люминесценции за счет поглощения материалом волновода и перепоглощения люминофором, $B_{\kappa\psi}$ – квантовый выход люминофора.

На рис. 3 представлена зависимость эффективной площади $S_{эф} = P_L / I_n$ пластины ЛВПС из поливинилового спирта с люминофором родамином 6G ($B_{\kappa\psi} = 0,94$) от длины L , рассчитанная для монохроматического света ($\bar{\lambda}_n = 300$ нм, $\bar{\lambda}_L = 600$ нм), концентрации люминофора 10^{-4} моль/л, коэффициента экстинкции $1.5 \cdot 10^4$ л/(моль*см), толщиной $\rho = 1$ см. В расчете не учитывалось френелевское отражение, а коэффициент поглощения излучения люминесценции считался не зависящим от расстояния, пройденного излучением в ЛВПС, и считался равным $\alpha = 0.005$ см $^{-1}$.

Искажение формы импульса в ЛВПС происходит в основном за счет следующих процессов [4]:

- Сложения оптических сигналов люминесценции от удаленных участков преобразователя, приходящих с временной задержкой;
- Искажение импульса в процессе люминесцентного преобразования;
- Модовая дисперсия сигнала в оптическом волноводе.

Искажение оптического импульса в процессе люминесцентного преобразования связано с инерционностью процесса преобразования излучения

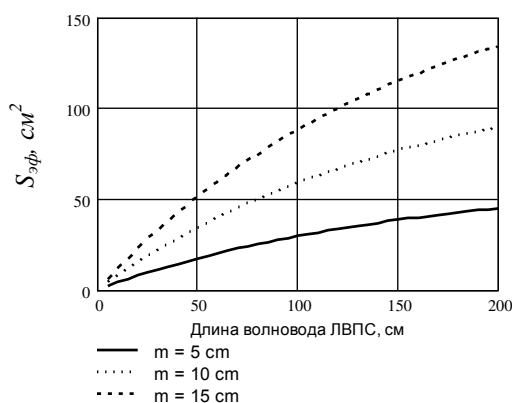


Рис. 3. Зависимость эффективной площади ЛВПС от длины пластины при ширине $m = 5, 10$ и 15 см

в люминофоре, и проявляется при $\tau_u < 10\tau_l$, где τ_u – длительность принимаемого оптического импульса, а τ_l – характерное время жизни молекул люминофора в возбужденном состоянии.

Первый вид искажения связан с тем, что импульсы излучения люминесценции с различных участков люминесцентного волноводного преобразователя приходят с разными временными сдвигами $\Delta t = f(L)$ и суммируются на выходе волновода. Если временной сдвиг Δt импульсов

люминесценции, приходящих с участков люминесцентного преобразователя $L > L_{max}$, будет больше длительности импульса люминесценции τ_l , то они будут

лишь увеличивать длительность результирующего импульса, не увеличивая его амплитуду. Отсюда условие, ограничивающее эффективную длину волноводного люминесцентного преобразователя:

$$L_{\max} \leq \frac{(\tau_u + \tau_l) \cdot c}{n}$$

Модовая дисперсия возникает вследствие разного времени прохождения волновода модами высших порядков по сравнению с фундаментальной модой и может достигать 10 нс в преобразователе длиной 1 м.

Несмотря на перечисленные ограничения энергетических и временных характеристик, коэффициент усиления интенсивности в ЛВПС равный

$$k_I = \frac{I_{\text{ЭАН}}}{I_{\text{вв}}} = \frac{S_{\text{вв}}}{m \cdot \rho} \quad (I_{\text{пад}} \text{ и } I_{\text{ЛВПС}} - \text{интенсивности падающего излучения и излучения}$$

на выходе ЛВПС) может достигать значений 100 и более. При этом угол поля зрения приемника на ЛВПС в основном определяется отражением принимаемого излучения от границ раздела сред воздух-оболочка и оболочка-волновод и может достигать $\omega \sim 50^\circ - 60^\circ$ ($2\omega \sim 100^\circ - 120^\circ$).

Большой интерес представляет вариант построения ЛВПС на оптических волоконных световодах. В этом случае, становится возможным использование стандартных компонент волоконно-оптических систем, таких как соединители, разветвители, переключатели и оптические усилители. Для анализа характеристик определения координат и скорости перемещения УФ излучателя была разработана экспериментальная гибридная волноводная линия из композиций элементов ЛПВС, соединенных обычным полимерным световодом.

Схема линии представлена на рис. 4.

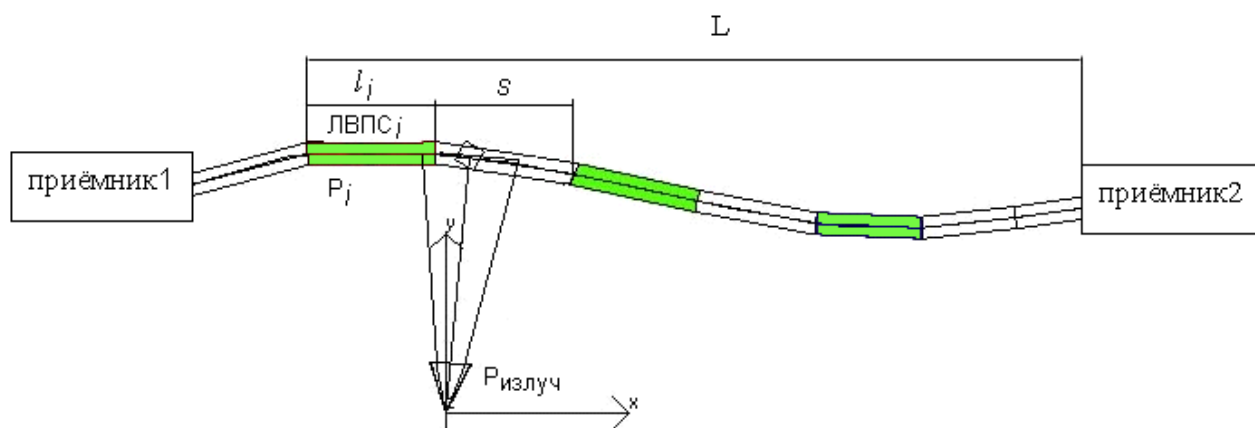


Рис. 4. Схема гибридной волноводной линии.

Определение координат подвижного УФ излучателя возможно двумя методами.

Первый метод базируется на анализе соотношения сигналов на входах приёмников 1, 2.

$$U_{\text{ex1}} = \alpha \cdot \Delta l_1, U_{\text{ex2}} = \alpha \cdot \Delta l_2$$

$$\Delta l_1 = \frac{P_{\text{ex1}}}{\alpha}, \Delta l_2 = \frac{P_{\text{ex2}}}{\alpha}$$

Во втором методе используется импульсная модуляция УФ излучения импульсом длительностью τ , при известной величине дисперсии волновода (нс/м), уширение принятого импульса будет пропорционально расстоянию до УФ излучателя.

Скорость перемещения в гибридном волноводе определяется следующей формулой:

$$V = \frac{n_{\text{имп}}}{\Delta t},$$

где $n_{\text{имп}}$ – количество импульсов от элементов ЛВПС_i за время наблюдения Δt .

Точность определения скорости перемещения УФ излучателя зависит от соотношения размеров элемента ЛВПС_i - l_i и промежутка S между ними.

Направление движения УФ излучателя легко определить из анализа соотношения последовательностей мощности принятого сигнала, например при $P_i > P_{i+1} > P_{i+2}$, излучатель удаляется, при $P_i < P_{i+1} < P_{i+2}$ – излучатель приближается.

Испытания гибридной линии длиной 5 м подтвердили приведенные теоретические предпосылки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А.. Полупроводниковые фотоэлектропреобразователи для ультрафиолетовой области спектра. Вестник РФФИ, 2003, № 4, с. 5 – 35.
2. Голубенков А.А., Поллер Б. В. Карапузиков А.И., Плюснин В.Ф., Малов А.Н «Характеристики ультрафиолетового газового излучателя и полимерного преобразователя спектра для лазерных телекоммуникаций», доклад на MPLP-2000 г., ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск.
3. Голубенков А. А., Плюснин В.Ф., Поллер Б. В. Приемник УФ излучения на основе раствора люминофора в пленке//Сборник докладов 7 МНТК «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж. – 2001.
4. Голубенков А. А. Люминесцентные волноводные преобразователи спектра для оптических приемников. //Сборник докладов 8 МНТК «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж. – 2002.
5. Стерлинг Дональд Дж. Техническое руководство по волоконной оптике: Пер. с англ. Москвиченко А. – Изд-во «Лори», 1998. – 288 с.
6. М. Барноски. Введение в интегральную оптику. Пер. с англ. Т. А. Шмаонова. – Изд-во «Мир», 1977. – 368 с.
7. Левшин Л. В., Салецкий А. М. Оптические методы исследования молекулярных систем. Ч. 1. Молекулярная спектроскопия. – М.: Изд – во МГУ, 1994. – 320 с

© Б.В. Поллер, А.В. Бритвин, А.А. Голубенков, Е.В. Удальцов, С.М. Игнатович, 2005

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИРОДНЫХ И ТЕСТОВЫХ ОБЪЕКТОВ

Задачей настоящих исследований является разработка методов обработки результатов оптических измерений при проведении автоматизированного дешифрирования многозональных космических снимков. Яркость природного объекта и яркость его изображения на снимке связаны довольно сложными формулами, учитывающими пропускание атмосферы, отражательную способность, расстояние до приемника излучения, зону спектра и т.д.

$$B_{i\text{об}} = \frac{1}{\Omega} \cdot R_c(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda) \cdot \rho_{i\text{об}}(\lambda), \quad (1)$$

$B_{i\text{об}}$ – яркость объекта,

$\tau_a(\lambda)$ – пропускание атмосферы,

Ω – телесный угол,

$R_c(\lambda)$ – светимость солнца на длине волны λ ,

$\rho_{i\text{об}}(\lambda)$ – коэффициент отражения объекта на данной длине волны.

Однако при одновременной регистрации изображений нескольких объектов большинство параметров в (1) будут одинаковы, поэтому их влияние можно устранить нормированием, т.е. делением яркости всех изображений на яркость изображения какого-либо «опорного» объекта, выбранного на этом же снимке. Тогда отношение яркости природных объектов будет равно отношению коэффициентов отражения этих объектов в заданном спектральном диапазоне, если яркость объекта слабо зависит от угла наблюдения [1].

$$\frac{B_{i\text{об}}}{B_{i\text{опорный об}}} = \frac{\rho_{i\text{об}}}{\rho_{i\text{опорный об}}}, \quad (2)$$

Практическая проверка этого соотношения осложнена трудностями однозначного сопоставления объектов, изображенных на снимке, со справочными данными коэффициентов спектральной яркости природных образований [2].

Для однозначного определения объекта и его оптических характеристик была создана и исследована модель природных образований. Для моделирования ландшафта были выбраны объекты, характерные для природных: земля, песок, растительность, вода. Съемки проводились с использованием селенового фотоэлемента и цифровой регистрации вольтметром В7-38. Спектральный диапазон выделялся оптическими фильтрами СЗС-8, ЖЗС-1, КС-11.

Для изменения освещенности использовался рассеянный солнечный свет (200 лк) и бытовые лампы накаливания (250 лк). Следует учитывать, что при этом изменялась не только освещенность, но и спектральный состав используемого излучения. На рис. 1 и 2 представлены графики яркостей тестовых объектов.

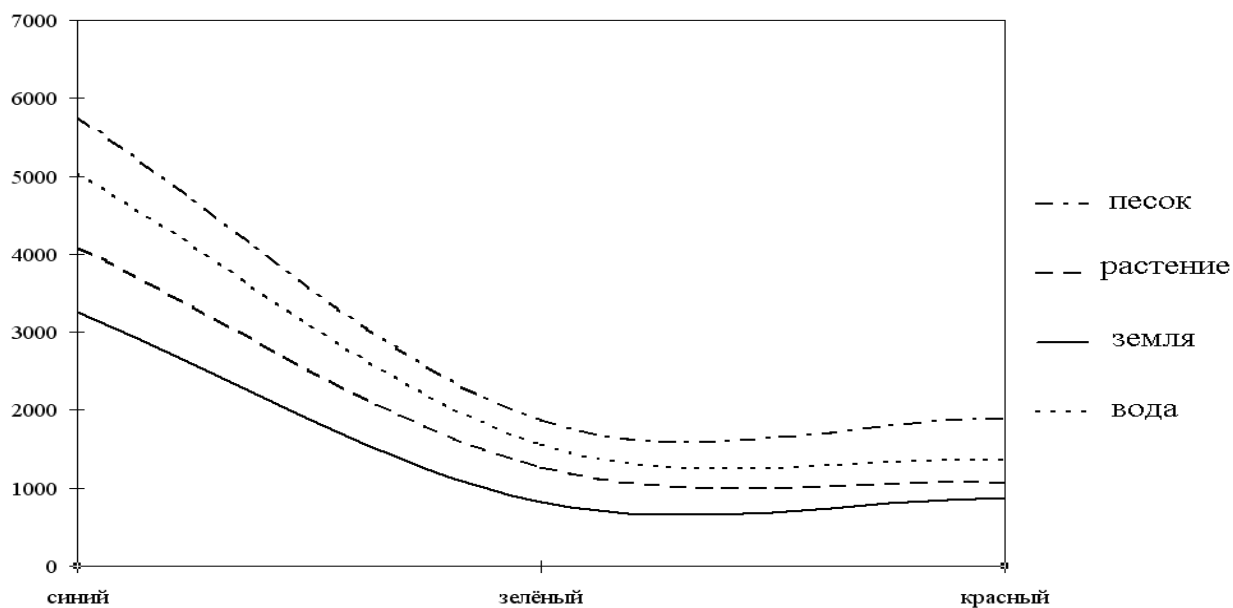


Рисунок 1 - Яркости тестовых объектов при солнечном свете

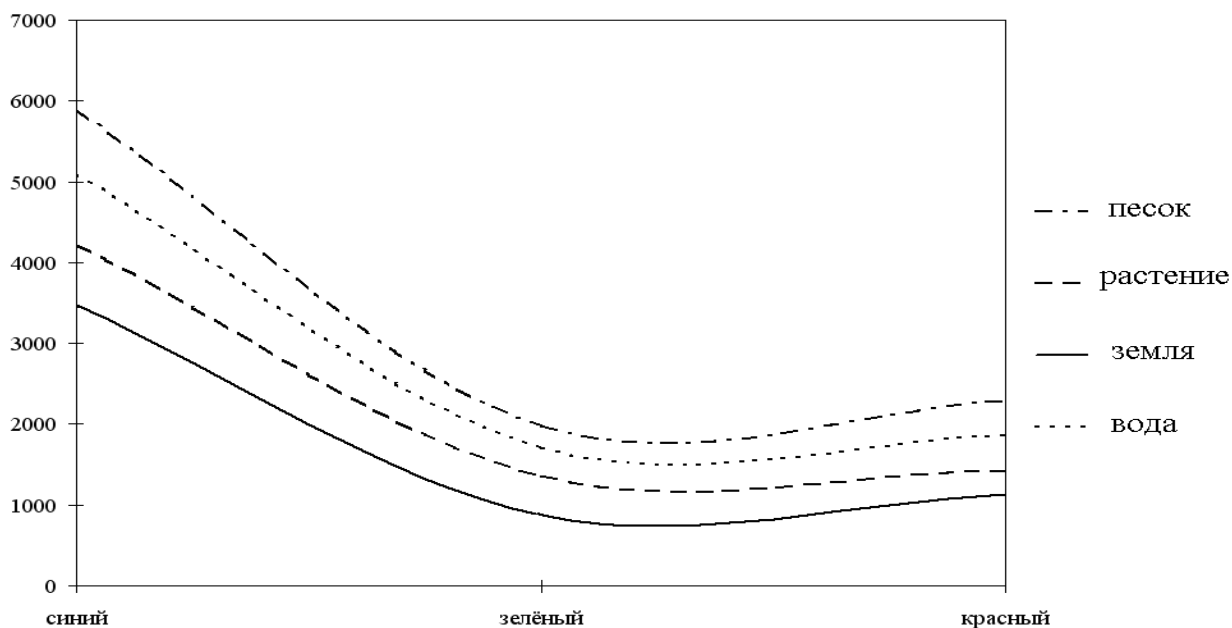


Рисунок 2 - Яркости тестовых объектов при лампе накаливания

Для определения изменения регистрируемой яркости тестовых объектов при изменении освещенности вводится коэффициенты $K_{ИСХ}$, которые являются отношением разности яркостей тестовых объектов при изменении освещенности к ее максимальному значению:

$$K_{ИСХ} = \frac{\Delta B(200лк - 250лк)}{B(250лк)} \cdot 100\% . \quad (3)$$

Графики относительных коэффициентов яркости $K_{ИСХ}$ представлены на рис. 3.

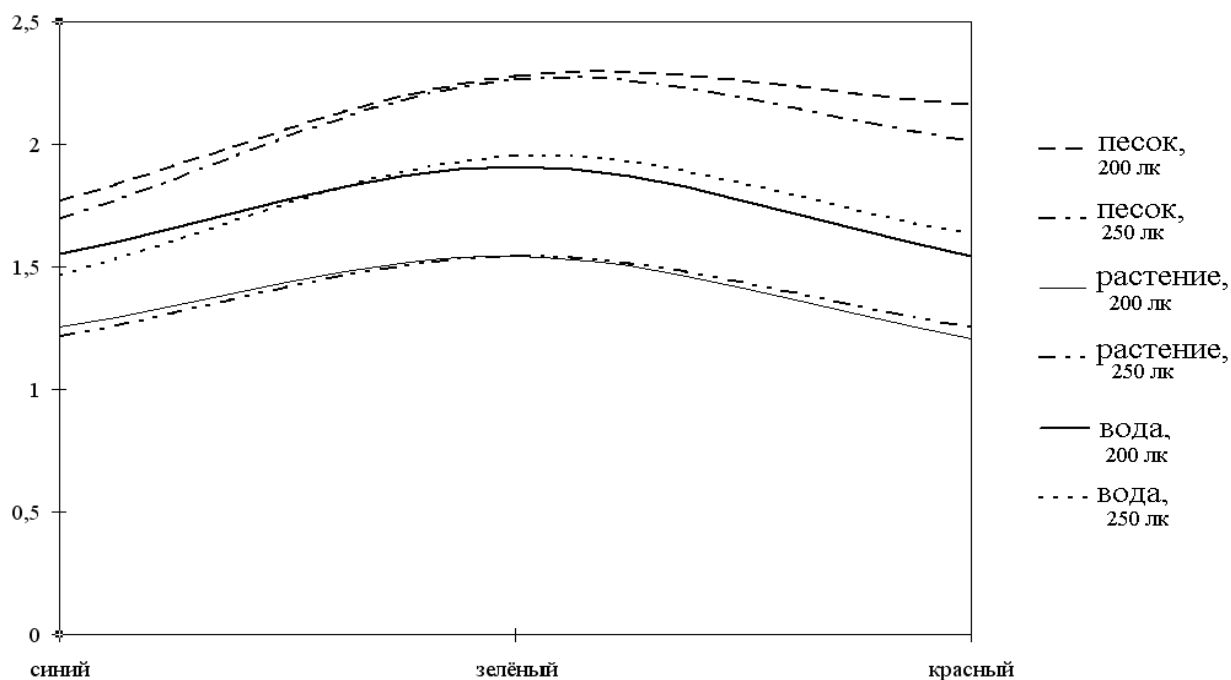


Рисунок 3 - Относительные коэффициенты яркости

Для выявления влияния обработки результатов вводятся дополнительные относительные коэффициенты $K_{\text{опорный}}$, которые определяются следующим образом:

$$K_{\text{опорный}} = \frac{\Delta B_{\text{опорный}}^{\text{норм}} (250 \text{ лк} - 200 \text{ лк})}{B_{i \text{ норм}}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где

$$B_{i \text{ норм}} = \frac{\frac{B_i}{B_{\text{опорный}}} (250 \text{ лк}) - \frac{B_i}{B_{\text{опорный}}} (200 \text{ лк})}{\frac{B_i}{B_{\text{опорный}}} (250 \text{ лк})} \cdot 100\% \quad (5)$$

В качестве опорных объектов были выбраны "земля" (K_3) и "песок" ($K_{\text{п}}$). Результаты сравнительного анализа расчета влияния изменения освещенности в процентах приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование объекта	Относительный коэффициент яркости, %	$\lambda_1 = 450 \text{ нм}$	$\lambda_2 = 540 \text{ нм}$	$\lambda_3 = 670 \text{ нм}$
Земля	$K_{\text{ИСХ}}$	6,88	6,28	22,78
	$K_{\text{П}}$	4,12	0,46	6,87
Песок	$K_{\text{ИСХ}}$	2,36	5,84	17,08
	K_3	4,3	0,5	7,4
Растительность	$K_{\text{ИСХ}}$	3,19	6,43	25,75
	K_3	3,4	0,16	3,85
	$K_{\text{П}}$	0,86	0,62	10,46
Вода	$K_{\text{ИСХ}}$	1,06	8,31	27,05
	K_3	5,7	2,2	5,5
	$K_{\text{П}}$	1,33	2,62	12,02

Результаты анализа показывают значительное снижение влияния условий освещения на характеристики объекта во всем спектральном интервале кроме синего, что может объясняться как нелинейностью характеристик приемника в этой области спектра, так и влиянием фоновых составляющих.

Кроме этого результаты эксперимента показали, что предложенная модель нормирования наиболее удачна для поверхностей с диффузным отражением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Симонова Г.В., Хлебникова Е.П. Нормирование яркости при цифровой обработке изображений. Разработка методики выбора эталонов при автоматизированном дешифрировании многоканальных снимков // Современные проблемы геодезии и оптики: Сб. материалов ЛП международной науч.- технической конф., посвященной 70-летию СГГА. 11-21 марта 2003г. Ч. I / СГГА. – Новосибирск, 2003. – 324 с.

2. Кринов Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований. – М. – Л., 1947. – 270с.

© Г.В.Симонова Е.П. Хлебникова, 2005

УДК 621.396

А.С. Толстиков

ФГУП «СНИИМ», Новосибирск

ИССЛЕДОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ КООРДИНАТНО-ВРЕМЕННЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

В работе обсуждается возможность решения ряда задач координатно-временных определений путём сведения их к задаче оценивания расширенного вектора состояния динамического объекта. К указанным задачам относятся:

- Оценивание текущих навигационных параметров КА по данным траекторных измерений[1,2];
- Восстановление траекторий высокодинамичных объектов по сигналам навигационных спутников (НС) КНС ГЛОНАСС/GPS;
- Формирование шкал времени групповых хранителей;
- Синхронизация пространственно-разнесённых хранителей времени по сигналам НС КНС ГЛОНАСС.

Постановка задачи оценивания. Задача координатно-временных определений трактуется как задача оценивания расширенного вектора состояния *динамического объекта*, описывающегося, в общем случае, нелинейным дифференциальным уравнением

$$\dot{x}=f(x,w,t), x(t_0)=x_0, \quad (1)$$

где $x^T=[x_i(t), i=1,\dots,n]$ – n -мерный вектор фазовых координат объекта;

$f^T(\cdot)=[f_i(\cdot), i=1,\dots,n]$ – n -мерная известная вектор-функция, допускающая дифференцирование по x,w,t .

$w^T=[w_i(t), i=1,\dots,m]$ – m -мерный вектор контролируемых и неконтролируемых возмущений, действующих на объект.

Наблюдению доступен вектор $z^T=[z_k(t), k=1,\dots,k]$, связанный с вектором фазовых координат объекта x , в общем случае, нелинейным *уравнением измерений*

$$z=H(x,v,t), \quad (2)$$

в котором $H^T(\cdot)=[h_k(\cdot), k=1,\dots,k]$ – k -мерная известная вектор-функция, допускающая дифференцирование по x,v,t ;

$V^T=[v_l(t), l=1,\dots,L]$ – вектор, объединяющий все факторы, влияющие на точность измерений $z_k(t)$.

Относительно w и v принято предположение, что это случайные вектор-процессы гауссовского типа

$$W=\mu_w+\tilde{w} \text{ и } V=\mu_v+\tilde{v}$$

с математическими ожиданиями μ_w и μ_v и центрированными составляющими

$$\tilde{w} \in N(0, R_w) \text{ и } \tilde{v} \in N(0, R_v)$$

с известными в ряде случаев корреляционными матрицами R_w и R_v . Для регулярных составляющих возмущений могут быть подобраны *согласующие математические модели* параметрического типа

$$\mu_w=\varphi(t,\alpha) \text{ а) и } \mu_v=\psi(t,\delta) \text{ б),} \quad (3)$$

в которых $\varphi(t,\alpha)$ и $\psi(t,\delta)$ – известные вектор-функции, допускающие дифференцирование по t,α,β . В частности, в качестве согласующих моделей (3) могут быть использованы линейные комбинации постоянных коэффициентов α и β и выбранных базисных функций.

При наличии в структурах объекта (1) и измерителя (2) согласующих моделей (3) с неизвестными параметрами α и β , формируется подлежащий оцениванию *расширенный вектор состояния* $y^T=[x_i^T, \alpha^T, \beta^T]$. В этом случае уравнение объекта (1) дополняется уравнениями

$$\dot{\alpha}=0, \dot{\beta}=0, \quad (4)$$

представляющими собой условия постоянства параметров согласующих моделей (3) на интервале оценивания.

В качестве наблюдаемых сигналов применяется разность $\Delta Z_1=Z-Z_{01}$ между вектором Z и некоторым *опорным вектором* Z_{01} , полученного расчетным путём посредством интегрирования уравнения

$$\dot{x}_{01}=f(x_{01},\mu_{w01},t), x_{01}(t_0)=\mu_{x01},$$

с учётом $\mu_{w01}=\varphi(\alpha_1,t)$ и последующего вычисления Z_{01} в соответствии с (2) с учётом $\mu_{v01}=\psi(\beta_1,t)$, где α_1 и β_1 – параметры и начальные условия μ_{x01} первого приближения. Для вектора ΔZ_1 справедливо линейризованное представление

$$\Delta Z_1=C[P \Delta x_N+S \Delta \alpha_1]+U \Delta \beta_1+D \tilde{V}, \quad (5)$$

а движение объекта относительно опорной траектории x_{01} описывается линейризованным уравнением

$$\Delta x_1=A \Delta x_1+S \Delta \alpha_1+B \tilde{W}, \Delta x_1(t_0)=\mu_{x0}-\mu_{x01}. \quad (6)$$

В (5) и (6) приняты обозначения

$$\begin{aligned} A &= \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{x_{01}}; B = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial w} \Big|_{w_1}; C = \frac{\partial H}{\partial x} \Big|_{x_0}; D = \frac{\partial H}{\partial v} \Big|_{x_1}; \\ S &= \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \alpha} \Big|_{\alpha_1}; V = \frac{\partial H}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial \beta} \Big|_{\beta_1}; P = \frac{\partial f}{\partial x_0} \Big|_{\mu_{01}} \end{aligned} \quad (7)$$

для матриц чувствительности объекта и измерителя к вариациям параметров $\Delta \alpha_1=\alpha - \alpha_1$; $\Delta \beta_1=\beta - \beta_1$, начальных условий $\Delta x_1(t_0)$, возмущений v_1 и w_1 . С учётом линейризованных представлений могут быть получены уравнения

$$\Delta \dot{Y}=\Phi \Delta Y+B w, \Delta Y(t_0)=\Delta Y_0, \quad (8)$$

$$\Delta Z=\Omega \Delta Y+D v, \quad (9)$$

описывающие движение объекта с расширенным вектором состояния ΔY относительно опорной траектории $Y_0^T=[x_0^T, \alpha_1^T, \beta_1^T]$ и уравнение измерений. Φ и Ω - блочные матрицы, объединяющие матрицы C, P, S, U, A ; ΔY_0 – расширенный вектор начальных условий. В (8), (9) – оптимальная оценка $\Delta \hat{y}$ расширенного вектора состояния линейризованного объекта (8) по наблюдениям ΔZ формируется на условиях минимума функционалов

$$J1 = \int_{t_0}^{t_k} \|\Delta Z - \Omega \Delta \hat{y}\| R_v dt; \quad \text{а)}$$

$$J2 = \int_{t_0}^{t_k} \|\Delta \hat{\hat{y}} - \Phi \Delta \hat{y}\| R_w dt \quad \text{б)} \quad (10)$$

$$J3 = \|\Delta \hat{\hat{y}}(t_0) - \mu \Delta y(t_0)\| \quad \text{в)}$$

взятых с различными весами.

Минимум функционала $J1$ соответствует условиям близости оценки $\Delta \hat{y}$ измерениям ΔZ в смысле наименьших квадратов; функционал $J2$ накладывает ограничения на гладкость оценки $\Delta \hat{y}$, а минимизация функционала $J3$, при выполнении условий наблюдаемости объекта [3], обеспечивает приближение оценки $\Delta \hat{y}$ к измерениям ΔZ за счёт подбора начальных условий $\Delta \hat{y}(t_0)$.

При фиксированном интервале оценивания $[t_0, t_k]$ и невысоком уровне помех $\tilde{V}$ и возмущений $\tilde{W}$ минимизация функционалов сводится к решению двухточечной краевой задачи. Оптимальная оценка $\Delta \hat{y}$ в этом случае удовлетворяет уравнению Эйлера в канонической форме [4]. Рассматриваемая

задача требует предварительного исследования, поскольку экстремумы функционалов J_1, J_2 и J_3 могут не совпадать и уравнения Эйлера могут быть неустойчивыми.

Если интервал оценивания неограничен, т.е. $t_K = t$, и относительный уровень помех $\tilde{V}$ высокий, для оценивания расширенного вектора состояния $\Delta Y(t)$ применяют алгоритмы динамической фильтрации калмановского типа [3] или комбинированные алгоритмы [5].

Для дискретных представлений уравнений (8) и (9)

$$\Delta Y(K+1) = F(K)\Delta Y(K) + G(K)\tilde{W}(K), \Delta Y(0), \quad (11)$$

$$\Delta Z(K) = \Omega(K)\Delta Y(K) + D(K)V(K), \quad (12)$$

где $\Delta Y(K) = \Delta Y(t_K)$; $\Delta Z(K) = \Delta Z(t_K)$, $F(K) = [E + h\Phi(K)]$, $G(K) = hD(K)$, $h = t_{K+1} - t_K$ шаг дискретизации, $\Delta Y(0) = [\Delta X_1^T(0), \alpha_1, \beta_1]^T$ – расширенный вектор начальных условий, уравнение оптимального фильтра будет иметь вид:

$$\Delta Y(K+1) = F(K)\hat{\Delta Y}(K) + K(k)[\Delta Z(k) - \Omega(k)\hat{\Delta Y}(k)], \quad (13)$$

где $K(k)$ – оптимальная матрица фильтра, рассчитывается при известных корреляционных матрицах R_V и R_W . Точность оценивания характеризуется величиной ошибки

$$e(K) = \hat{\Delta Y}(K) - \Delta Y(K) \quad (14)$$

и определяется вынужденной составляющей уравнения динамики, полученного непосредственно из (11), (12), (13) с учётом представления (14). Непосредственно из уравнения динамики может быть получено уравнение Рикатти для расчета ковариационной матрицы $\text{cov}\{e(K)\}$.

Полученные тем или иным способом оценки расширенного вектора состояния ΔY являются оценками первого приближения относительно опорной траектории ΔY_{01} и могут быть уточнены путём формирования новой опорной траектории ΔY_{02} с начальными условиями $[(x'_{01} + \Delta \hat{x}_0), (\alpha_1 + \hat{\alpha}), (\beta_1 + \hat{\beta})^T]$ и повторения процесса оценивания $\hat{\Delta Y}$ до выполнения принятых правил останова итерационной процедуры.

Применительно к решению обозначенных выше задач координатно-временных определений настоящая методика непосредственно используется для *оценивания текущих навигационных параметров КА по данным беззапросных траекторных измерений* [1,2]. Оцениваются начальные условия уравнения движения КА и параметры согласующих моделей для оценки возмущений от радиационного давления на КА, и расчёта согласующих поправок к уходам бортовых часов и части тропосферной задержки. Сходимость и точность оценивания исследовались методом имитационного моделирования с помощью разработанного в СНИИМ программного имитатора измерительной информации [6].

При решении задач оценивания *состояния высокодинамического объекта*, (летательного аппарата (ЛА)), использовались уравнения движения вида (1), связывающие силы, действующие на ЛА, со скоростями движения и моментами сил в связанной с ЛА системе координат. Уравнение измерений применялось

линейное с матрицей (9) с матрицей Ω переводящей движение ЛА в геоцентрическую систему координат. Уточнению с помощью согласующих моделей подлежат ряду аэродинамических параметров ЛА и параметры возмущений.

При формировании шкал времени групповых хранителей и синхронизации удалённых хранителей линейные уравнения вида (8) описывают нестабильности частот каждого из входящих в группу стандартов. В линейном уравнении (9) матрица Ω является коммутационной, обеспечивающей сравнения по частоте каждого из входящих в группу стандартов с опорным стандартом. Особенностью этих систем является то обстоятельство, что они являются ненаблюдаемыми в смысле [3]. Сложности, связанные с ненаблюдаемостью удаётся преодолеть привлечением дополнительных регуляризующих условий в виде функционала J_2 . При этом формирование матрицы $K(k)$ в уравнении фильтра (13) проводится с учётом требований устойчивости фильтра.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Решетнёв М.Ф., Лебедев А.А., Бартенев В.А. и др. Управление и навигация искусственных спутников Земли на околокруговых орбитах. – М.: Машиностроение, 1988. – 336с.
2. Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. – М.: Сов. радио, 1978. – 384 с.
3. Сейдж Э.П., Мелса Д.Л. Идентификация систем управления. – М.: Наука, 1974, - 248с.
4. Сейдж Э.П., Уайт Ч.С. Оптимальное управление системами. – М.: Радио и связь, 1982. – 392с.
5. Бартеньев В.А., Гречкосеев А.К. Комбинированный алгоритм определения и прогнозирования параметров движения ИСЗ с использованием адаптации. – «Космические исследования», 1986, №4, с. - 564 – 574.
6. Владимиров В.Н., Гречкосеев А.К., Толстиков А.С. Имитатор измерительной информации для отработки эфемеридно-временного обеспечения космической навигационной системы ГЛОНАСС. – «Измерительная техника», 2004, №8, с. – 12 – 14.

© А.С. Толстиков, 2005

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ АППАРАТУРЫ JAVAD LEGACY ДЛЯ ТРАЕКТОРНЫХ И ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

С 2001 года в ФГУП СНИИМ введён в постоянную работу программно-аппаратный комплекс Javad Legacy-E, включающий в себя 40-канальный двухчастотный (L1,L2) приёмник сигналов ГЛОНАСС, GPS в исполнении EUROCARD, EURO-2 с антенным модулем Leqant, установленным на крыше корпуса №2 СНИИМ. Для сбора метеоданных и последующего расчёта тропосферных поправок к измерениям развёрнута автоматическая метеостанция HUGER WM-918. Приёмный модуль работает с внешним опорным высокостабильным сигналом 5МГц, формируемым водородным стандартом частоты Ч1-70. Сигнал 1PPS приёмника, несущий информацию о положении моментов шкал времени ГЛОНАСС time и GPS time сравнивается со шкалой UTC(Нм) вторичного эталона времени и частоты ВЭТ 1-19 с помощью частотомера ЧЗ-64. Бинарные файлы наблюдений, формируемые в приёмном модуле под управлением ПО PC-CDU, файлы метеоданных с WM-19 и результаты шкальных измерений с ЧЗ-64 накапливаются в технологическом компьютере, откуда в виде суточных файлов передаются потребителям.

Данные координатно-временных определений описываемого комплекса Javad Legacy-E применяются:

- Для определения параметров вращения Земли (ОПВЗ) в структуре сети российской службы ОПВЗ и в международной службе IERS;
- Для контроля временного поля КНС ГЛОНАСС и GPS;
- В качестве образцового средства измерения при поверке аппаратуры пользователей КНС ГЛОНАСС и GPS.

Программно-аппаратный комплекс Javad Legacy-E также используется в качестве прототипа беззапросной измерительной станции (БИС) для траекторных измерений по орбитальной группировке КА ГЛОНАСС и при лётных испытаниях системы ГЛОНАСС с КА 14Ф113.

Важность решаемых задач и высокие требования к точности и надёжности координатно-временных определений, проводимых с Javad Legacy-E, заставляет проводить исследования факторов, влияющих на точность результатов измерений и вести контроль показателей, характеризующих качество измерений. Этим вопросам посвящена настоящая работа.

Необходимо отметить, что по каждому КА радиовидимой орбитальной группировки с шагом 30 секунд фиксируется пять измерений псевдодальностей:

- C/A - кодовые измерения в диапазоне L1;
- P – кодовые измерения в диапазоне L2;
- Фазовые измерения в диапазоне L1;
- P – кодовые измерения в диапазоне L2;
- Фазовые измерения в диапазоне L2;

а также усреднённые по ансамблям КА ГЛОНАСС и КА GPS оценки моментов шкал времени ГЛОНАСС time и GPS time соответственно.

В связи с предстоящим комплексом лётных испытаний возникла необходимость провести анализ сбойных ситуаций возникших на Javad Legacy-E в период с 10.11.2004 по 24.01.2005, которые выразились в следующем:

- В пропадании измерений по P – коду и фазе на частоте L2;
- Увеличении значений характеристик разбросов данных в оценках положения шкал ГЛОНАСС time и GPS time;
- В увеличении до 30-40° углов места, при которых возникает захват КА GPS на частоте L2;
- В появлении разрывов в данных измерений псевдодальностей.

Возникла необходимость в мероприятиях по улучшению функционирования аппаратного комплекса и разработке ПО, позволяющего извлекать дополнительную информацию о состоянии КНС ГЛОНАСС, GPS и комплекса Javad Legacy-E.

Прежде всего, выяснилось, что принимаемая информация имеет низкие соотношения сигнал/шум. Причём для КА GPS эти соотношения на L2 имеют значения 10-12, что в 2 раза ниже, чем на частоте L1. Для КА ГЛОНАСС соотношения сигнал/шум на L1 и L2 примерно равны.

Возникшая неблагоприятная шумовая обстановка в определённой мере была связана с высокоэнергетичными строительно-монтажными работами, проводимыми в корпусе №2 СНИИМ в указанный период. Причём чувствительными к помехам оказались не только входные антенные тракты, но и канал, по которому подавался сигнал опорной частоты 5 МГц. Действительно, опорная частота вместе с шумом участвует в процессе гетеродинных преобразований несущей частоты входного сигнала. Вследствие этого шум входного сигнала и шум канала опорной частоты совместно проходят по входным трактам приёмного модуля Javad.

Улучшить ситуацию с шумом удалось применением дополнительных контуров заземления, причём точка заземления всей периферийной по отношению к приёмнику аппаратуры (генератор Ч1-70; антенный модуль, источник питания) была перемещена к входному тракту приёмника. Это, по существу, позволило зашунтировать все помехи, наводимые во входные тракты приёмника. После улучшения контуров заземления пропадания приёмов КА GPS на частоте L2 прекратилось.

Для получения дополнительной информации о состоянии орбитальных группировок КА ГЛОНАСС и GPS была изменена программа, управляющая работой приёмного модуля Javad Legacy и разработано дополнительное ПО.

Стало возможным отображать текущее состояние орбитальных группировок КА в виде временных диаграмм. Такая диаграмма по состоянию орбитальной группировки на 31.01.2005 г. приведена на рис. 1.

Разработаны средства графического отображения поведения шкал времени GPS time и ГЛОНАСС time на суточных интервалах наблюдения. На рис. 2 показаны реализации процессов GPStime и ГЛОНАССtime за 31.01.2005 г.

Синхронное рассмотрение диаграмм на рис. 1 и реализаций на рис. 2 позволяет увидеть, что скачки в реализации ГЛОНАССtime связаны со сменой состава орбитальной группировки КА ГЛОНАСС. В частности, начиная с 2000 отсчёта (Рис. 2) наблюдаются скачки на 120 нс. Шкалы времени ГЛОНАСС time. Этому моменту на Рис. 1 соответствует уменьшение состава орбитальной группировки. КА ГЛОНАСС 793 и 788 видны под малыми углами места (максимально 20° и 16° соответственно), что определяет высокий уровень погрешности воспроизведения моментов времени.

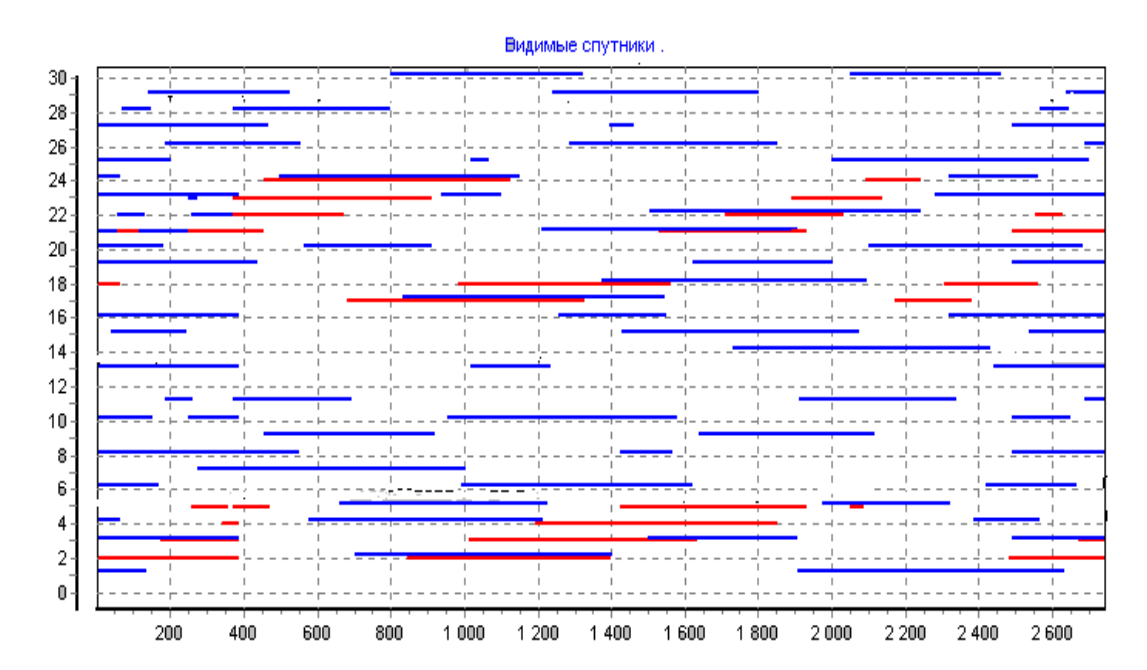


Рис. 1. Спутники, наблюдаемые аппаратурой JAVAD, 31.01.2005г., с 0:00:00 по 23:59:00:

где по оси абсцисс – интервалы времени устойчивого приёма навигационных сигналов КА (через 30 с.); по оси ординат – номера КА; красным цветом обозначены КА ГЛОНАСС, синим – GPS.

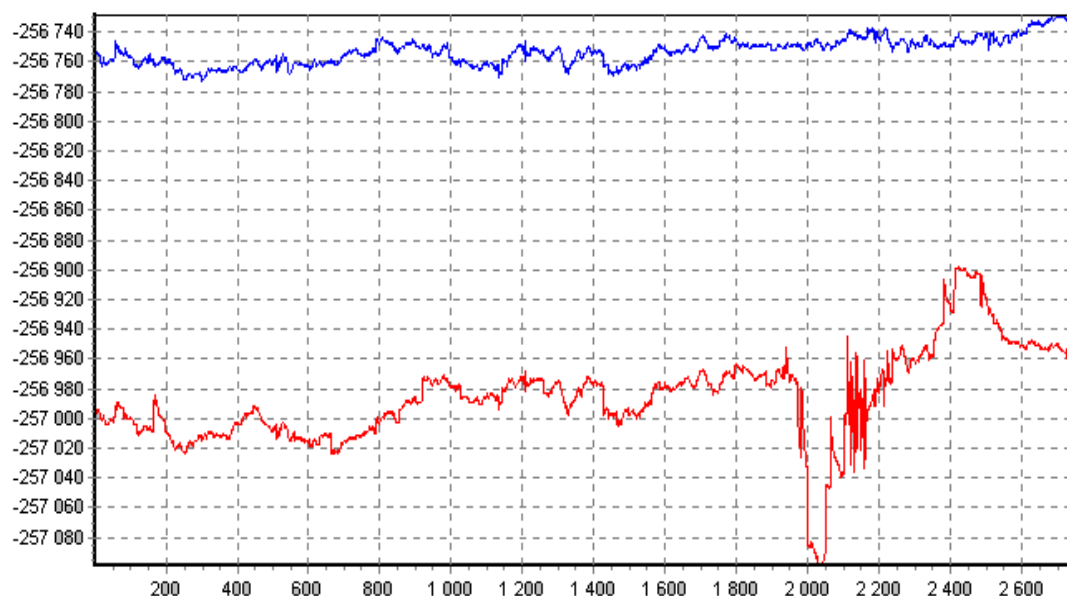


Рис. 2. Воспроизведение приёмником JAVAD шкал времени систем ГЛОНАСС и GPS за 31.01.2005г., с 0:00:00 по 23:59:00:

где по оси абсцисс – текущие отсчёты приёмника (через 30 с.), по оси ординат расхождения ШВ приёмника JAVAD и ШВ систем ГЛОНАСС (ЦС) и GPS (USNO), (нс.).

Красным цветом показано расхождение ШВ приёмника относительно ШВ USNO, синим – относительно ЦС.

Анализ реализаций ГЛОНАССtime за следующие дни показывает, что ситуация с высоким уровнем погрешностей воспроизведения ГЛОНАССtime на период с 17.00 – 20.00 часов местного времени повторяется, что связано с недостаточностью орбитальной группировки КА ГЛОНАСС в настоящее время.

На рис. 2 можно увидеть смещения средних значений GPStime и ГЛОНАССtime на суточном интервале на 18-20 нс. Эти смещения следует отнести за счёт отклонения частоты применяемого водородного стандарта ВГ-705 типа Ч1-70 от номинала на $2 \cdot 10^{-13}$. Это отличие наблюдается также по результатам внутренних сличений ВГ-705 с другими стандартами из состава эталона ВЭТ 1-19. Такая чувствительность наблюдаемых шкал GPStime и ГЛОНАССtime к уходам частоты опорного сигнала 5 МГц позволяет использовать приёмный модуль Javad Legacy для оценивания действительного значения частоты стандарта подлежащего калибровке, сигнал которого используется в качестве опорного сигнала, с погрешностью $\pm 1 \cdot 10^{-13}$.

Для реализации высокоточных траекторных измерений по КА 14Ф113 в управляющей программе обеспечено формирование данных кодовых и фазовых измерений в виде 64- битовых последовательностей. В штатном режиме Javad Legacy формирует 32- битовые измерения.

Для исключения влияния на результаты измерений отдельных выбросов, возникающих в результате переотражения сигналов КА от соседних

металлических конструкций (мачты антенн) применён медианный фильтр с изменяемой апертурой (от 3 до 21 отсчёта).

Совместно с сотрудниками НПО ПМ им М.Ф. Решетнёва разработано и применяется специализированное ПО, позволяющее:

- Выделять из данных в формате RINEX измерения по заданному КА и по каждому из пяти видов измерений;
- Проводить медианную фильтрацию данных;
- Проводить сглаживание данных на подынтервалах длительностью 5 минут с помощью полиномов Чебышева (длительность интервала можно изменять);
- Выделять шумовые дорожки измерений в виде разностей между измеренными и сглаженными данными на каждом подынтервале и оценивать характеристики разбросов измерений.

Оценки ширины шумовой дорожки по каждому виду измерений (три кодовых псевдодалности и фазовые измерения на частотах L1 и L2) являются сравнительной характеристикой качества измерений.

© И.Е. Макаров, Ю.В. Носков, А.С. Толстиков, 2005

О ЛАЗЕРНОМ ИЗЛУЧАТЕЛЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Для решения ряда задач современных микро- и нанотехнологий требуются лазерные устройства, обладающие специальными параметрами выходного излучения:

- Сверхмалой длительностью выходных импульсов ($\sim 10^{-9} - 10^{-12}$ с);
- Достаточно большой мощностью в моноимпульсе (≥ 100 кВт);
- Большой частотой следования импульсов излучения ($\sim 10-20$ кГц).

Реализация этих требований в комплексе – достаточно сложная задача. В работе проведены исследования по выявлению условий максимально приближенных к решению указанной задачи.

Условием существования генерации в лазере является образование стоячей волны в резонаторе, когда свет осуществляет двойной обход резонатора. Для лазеров с модулированной добротностью это условие налагает принципиальное ограничение на длительность импульса: длительность τ пропорциональна величине $2L/C$ (L - длина резонатора, C - скорость света в среде) и обратно пропорциональна разности значений усиления и пассивных потерь в резонаторе B

$$\tau = \frac{2L}{CB}.$$

Исходя из этих представлений, предполагалось получить непрерывную генерацию в лазере с коротким резонатором, а затем методом внутрирезонаторной модуляции потерь получить сверхкороткие импульсы излучения. Для обеспечения требуемой мощности в отдельном импульсе необходимо получить изначально большую мощность генерации лазера в непрерывном режиме.

Эксперименты по получению непрерывной генерации на лазерных кристаллах YAG

Средняя мощность непрерывной генерации, необходимая для получения импульсной мощности выходного излучения $P_{\text{и}} = 100$ кВт с длительностью импульса 1 нс и частотой следования $F = 10$ кГц оценивалась согласно соотношения $P_{\text{ср}} = P_{\text{и}} \cdot \tau \cdot F_{\text{мод}}$ и составила 1 Вт. Заметим, что это заниженная оценка, т.к. не учтены потери, которые внесет модулятор в резонатор лазера. Эти потери возрастут значительно, что отразится на величине средней мощности.

В эксперименте проверялись на генерацию ряд кристаллов YAG: $6,3 \times 65$ мм; $5,0 \times 55$ мм; $4,0 \times 65$ мм. Резонатор лазера варьировался в пределах от 80 см до минимальной длины 8 см, при этом использовались различные конфигурации зеркал: от плоскопараллельного до выпуклогогнутого (телескопическая система). Структурная схема лазерного резонатора представлена на рис. 1:

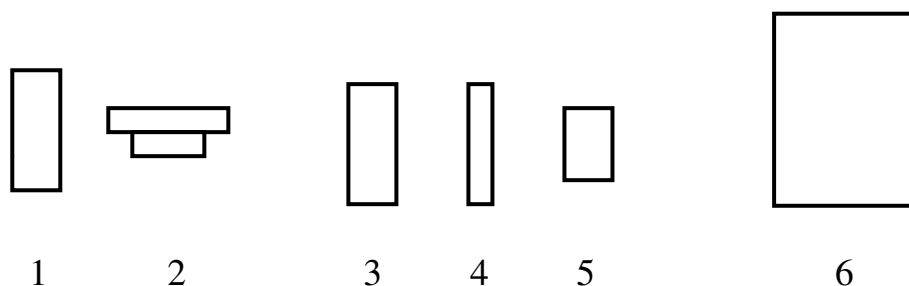


Рис. 1

1, 3 – зеркала резонатора. Отражение зеркала 1 – 100%, отражение зеркала 3 – 84 – 97%, 2 – квантрон с лазерным кристаллом, 4 – ослабитель, 5 – фотоприемник, 6 – осциллограф либо измеритель мощности лазерного излучения

В коротком квантроне (К- 301 – А) с кристаллом 4,0 x 65мм была получена непрерывная генерация с $P_{\max} = 2\text{Вт}$ при предельном токе лампы накачки (ДНП-6/60) равном 37А. Большую мощность в непрерывном режиме с кристаллами YAG получить не удалось.

Для получения импульсного режима генерации при непрерывной накачке резонатор YAG-лазера помещался *пассивный затвор LiF/F_2* .

Средняя выходная мощность лазера при этом снижается до десятков мВт. Для получения выходной импульсной мощности 100 кВт в режиме пассивной модуляции непрерывной мощности генерации лазера 1 – 2Вт не достаточно. Как выяснилось, кристаллы YAG, как источники непрерывной генерации, обладают двумя существенными недостатками, обусловленными физической природой кристаллов: *при большом уровне накачки вредными факторами становятся паразитная генерация на внутренних модах и суперлюминесценция*. Эти два явления в сильной степени ограничивают выходную мощность генерации активных кристаллов YAG.

Первый фактор - внутренние моды распространяются в лазерном кристалле под углом к боковой поверхности и не излучаются из резонатора, а циркулируют внутри образца в некоторой области углов, отражаясь от торцов кристалла. Поэтому энергия, затрачиваемая на их возбуждение, не увеличивает осевой лазерной мощности, а расходуется на спонтанное излучение и нагрев кристалла. Это приводит к росту потерь в резонаторе.

Второй фактор – суперлюминесценция. Лазерный переход YAG имеет большое сечение усиления σ_{32} (четырёхуровневая схема возбуждения), и как следствие, большое усиление всего кристалла. При этом в кристалле существует большое предпороговое усиление. В результате вдоль оси кристалла возникает и распространяется интенсивное и высоконаправленное излучение. Состояния инверсной населенности возникают хаотически. Причем процесс происходит в отсутствии оптического резонатора, т.е. без участия обратной связи. Этот процесс дополнительно ограничивает выходную мощность генерации в YAG.

Получение непрерывной генерации на ортоалюминате иттрия YAL (YAlO₃/Nd³⁺)

В лазерных кристаллах ортоалюмината иттрия сечение усиления рабочего перехода значительно меньше сечения усиления кристаллов YAG. Как следствие этого, две рассмотренные причины уменьшения выходной мощности лазера для кристаллов YAL отсутствуют или значительно ослаблены, что делает эти кристаллы более предпочтительными для получения непрерывной генерации.

Эксперименты по получению непрерывной генерации были проведены с кристаллом YAL размерами 4 x 65мм. Резонатор представлял собой плоскопараллельную систему (зеркало глухое , выходное зеркало плоское с пропусканием 16% , квантрон К301-А), длина резонатора 30см. При указанных параметрах лазера была получена выходная мощность в непрерывном режиме $P_{ср} > 30$ Вт. В укороченном резонаторе длиной 8см и пропускании выходного зеркала 3% была получена непрерывная генерация 15 Вт при максимальном токе накачки лампы ДНП-6/60 равным 37А.

Эксперименты модуляции излучения пассивными затворами

Исследовались режим гигантского импульса в YAG-лазере при импульсной накачке и модуляция непрерывного излучения YAL-лазера пассивными затворами. Структурная схема для этих исследований представлена на рис. 2.

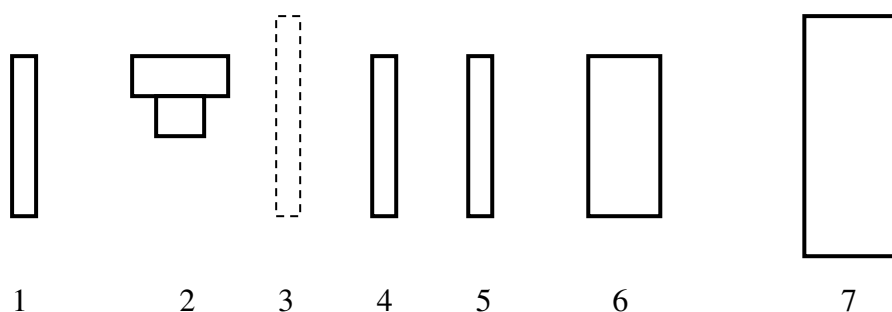


Рис. 2

Длина резонатора 8см, кристалл YAG/Nd 5 x 50мм, где 1 – глухое зеркало, 2 – квантрон, 3 – пассивный затвор толщиной 20мм с начальным пропусканием 30%, 4 – выходное зеркало с пропусканием 60%, 5 – нейтральный фильтр НС – 19, 6 – ФЭК – 26, 7 – осциллограф С1-97

При работе лазера в режиме импульсной накачки получены гигантские импульсы длительностью 1,5 – 2 нс при минимальных уровнях накачки в 30 Дж, энергия импульса была 12мДж, что соответствует импульсной мощности ~6МВт. Согласно выражению для длительности импульса, с увеличением уровня накачки активного кристалла длительность импульса должна уменьшаться. Это и продемонстрировал эксперимент. При длине резонатора около 10см и минимальном уровне импульсной накачки возможно получить моноимпульс длительностью 1нс, а повышая уровень импульсной накачки при той же длине резонатора, можно перейти в пикосекундный диапазон длительностей выходного импульсного излучения.

Здесь отметим, что в непрерывном режиме накачки не реализуются условия уменьшения длительности импульса за счет разности «усиление-

потери» в силу невозможности их технической реализации в наших условиях. Использование большой световой мощности в ограниченном объеме квантрона требует эффективного охлаждения, что проблематично в имеющихся устройствах. Из-за ограничения мощности накачки возможность уменьшения длительности импульса из-за разности «усиление-потери» в режиме непрерывной накачки не используется в полной мере в устройствах с ламповой накачкой, и совсем не используется в устройствах с диодной накачкой. Те же проблемы возникают при получении наносекундных длительностей лазерного излучения в режиме диодной накачки, где укорочение активного элемента отражается на мощностных параметрах выходных импульсов. Для получения требуемой мощности лазерного излучения необходимы каскады усиления и т.д. С этой точки зрения импульсный режим накачки для формирования 100КВт-ных наносекундных импульсов с максимальной частотой следования 100-1000Гц, на наш взгляд, является наиболее оптимальным.

Были проведены эксперименты с пассивными затворами для режимов непрерывной генерации лазеров с кристаллами YAL. Для модуляции излучения использовались пассивные затворы LiF и «черный YAG». При непрерывной генерации мощностью 20Вт наблюдалась модуляция излучения с частотой 1,4кГц при средней мощности излучения порядка 150мВт. Использовались также пассивные затворы для обострения импульсов модуляции при формировании импульсов активным затвором. При проведении экспериментов с акустооптическим модулятором совместно с пассивным затвором LiF выяснилось, что частота модуляции генерации значительно снижается (примерно на порядок) по сравнению с частотой генерации в случае только активного модулятора. Это объясняется недостаточностью энергии накачки активного кристалла для обеспечения просветления пассивного затвора за период активной модуляции.

Эксперименты модуляции лазерного излучения активным затвором Ka TiO PO₄ (КТР)

Для модуляции непрерывного излучения и получения коротких импульсов был изготовлен модулятор из материала КТР размерами 0.2 x 0.2 x 1.8см. Кристалл располагался на специальной платформе и кабелем соединялся с источником питания и термостабилизации. Для управления кристаллом используется поперечный эффект Поккельса с квадратичной зависимостью разности хода двух ортогональных поляризаций от управляющего напряжения, приложенного к кристаллу. Кристалл размещен на элементе Пельтье для создания оптимальной температуры работы кристалла. При этом обеспечивается получение полуволнового напряжения на кристалле. Блок управления обеспечивает частоту модуляции от 0 до 10кГц. Модулятор помещался в резонатор лазера. Кроме того, в резонаторе лазера располагались два кварцевых окна под углом Брюстера, что обеспечивало получение линейно поляризованного излучения, необходимого для работы модулятора. Длина резонатора в эксперименте была 20см. Схема экспериментальной установки показана на рис. 3.

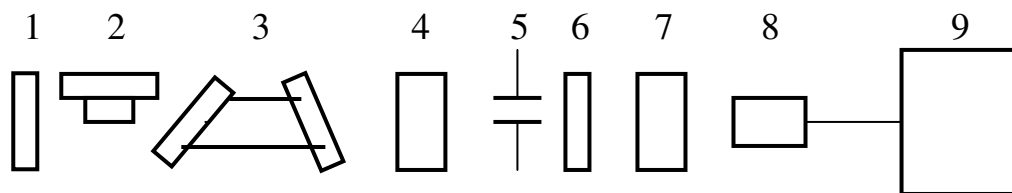


Рис. 3

1-зеркало плотное, 2-квантрон с кристаллом YAL 4x65мм, 3-кювета с брьюстеровскими окнами, 4-модулятор КТР, 5-диафрагма диаметром 2мм, 6-выходное зеркало с R=10%, 7-ослабитель излучения, 8-приемник излучения ФД-2, 9-осциллограф

Средняя мощность излучения лазера была порядка 250мВт. Оценка импульсной мощности – 2кВт .

При работе активного модулятора на экране осциллографа наблюдались импульсы модуляции шириной порядка 50нс. Оценка ширины импульса модуляции производилась также расчетным путем по известной формуле в предположении амплитудно-модулированного сигнала.

$$\tau \approx \frac{\sqrt{\ln 2 \cdot \tau_{32}}}{\sqrt{F}} \sqrt[4]{\frac{Gl}{\delta}}$$

здесь F – частота модуляции, τ_{32} - время релаксации лазерного перехода, G – усиление лазерного перехода, l – длина лазерного кристалла, δ - глубина модуляции. Расчетные параметры следующие: F = 10кГц, $\tau_{32} = 1.4 \cdot 10^{-12}$ с, G = 0,05см⁻¹, l = 5см, $\delta = 0,8$. В результате расчет дает значение длительности импульса ~15нс.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования показали, что получить в комплексе параметры лазерного излучения, указанные в начале статьи, представляется проблематичным. Решение этой задачи возможно только в режиме импульсной накачки активных элементов лазеров современными полупроводниковыми диодами, обладающими достаточной мощностью и необходимыми частотными параметрами. Для режима непрерывной накачки эта задача, на наш взгляд, требует значительных дополнительных исследований.

© С.И.Коняев, Б.С.Могильницкий, Ю.Д. Коломников, Б.В.Поллер, 2005

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ИСЗ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ГЛОНАСС И GPS: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПВЗ

Определение ПВЗ в России по данным системы GPS производится в ИМВП (п. Менделеево) на основе обработки *фазовых* измерений GPS, получаемых на пунктах России и стран СНГ. Обработка измерений и вычисление ПВЗ выполняется при помощи программного комплекса BERNESSE-4.0 Бернского университета. В связи с впечатляющим развитием координатно-временных технологий обеспечения системы ГЛОНАСС в настоящее время появилась возможность использования этих технологий для вычислений ПВЗ методом определения псевдодальностей до ИСЗ по данным беззапросных измерений [1]. Здесь необходимо отметить, что определение ПВЗ по данным траекторных измерений ИСЗ ГЛОНАСС производится в подсистеме контроля и управления измерения траекторных навигационных параметров (КНИЦ) уже с 1984г [2]. Кратко рассмотрим метод дальностей, для вычислений ПВЗ.



ПВЗ представляют собой мгновенные координаты полюса Земли x_p, y_p , и скорость вращения ω_z , приводящую при ее непостоянстве к изменению длительности земных суток ΔD и расхождению шкал всемирного UT1 и координационного времени UTC. Являясь связывающим звеном между инерциальной и земной системами координат, ПВЗ непрерывно изменяются и фактически определяют процесс координатного обеспечения объектов. Большой

объем измерений, независимость от метеоусловий, относительно высокая точность позволяет организовать оперативное определение ПВЗ по результатам ИТНП навигационных КА систем ГЛОНАСС и GPS. Задача решается при совместном уточнении ПВЗ и параметров орбит ИСЗ. Алгоритм расчета ПВЗ может быть следующим: если известны координаты станции в средней экваториальной СК, то переход к инерциальным геоцентрическим координатам можно осуществить по формуле:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = R_x(-\varepsilon) R_z(\Delta\Psi) R_x(\varepsilon + \Delta\varepsilon) R_z(-S_\otimes) R \begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

где

$$R_z(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; R_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}; R \begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -X_p \\ 0 & 1 & Y_p \\ X_p & -Y_p & 1 \end{pmatrix},$$

здесь хуz- средняя экваториальная система, XYZ- инерциальная система,
 ε – наклон плоскости подвижного экватора к плоскости мгновенной эклиптики,

$\Delta\psi$ – нутация в долготе, $\Delta\varepsilon$ – нутация в наклоне, $S_{\oplus}$ – истинное звездное время

Гринвического меридиана, вычисляемый на момент $(t + \Delta UT(t))$.

Вычисленная топоцентрическая дальность $\rho_c(t)$ по формуле:

$$\rho_c = \sqrt{(x - X)^2 + (y - Y)^2 + (z - Z)^2}$$

дает возможность ввести «невязки» - разности значений величин вычисленной и измеренной дальностей

$$\Delta\rho = \rho_o(t) - \rho_c(t), \quad (1)$$

где ρ_o - измеренная дальность до ИСЗ. Невязки обусловлены как ошибками наблюдений, так и погрешностями в принятой модели вычисления величины $\rho_c(t)$. В результате появляется возможность выявления погрешностей этой модели. Это производится путем дифференциального улучшения орбит методом наименьших квадратов. Применительно к данной задаче уравнения фильтрации выглядит следующим образом. Выражение (1) можно представить в виде

$$\Delta\rho = A \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} + B \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} \quad (2)$$

где

$$A = \left(\frac{x - X}{\rho_c}, \frac{y - Y}{\rho_c}, \frac{z - Z}{\rho_c} \right), B = -A. \quad (3)$$

Переход от выражений (1) к (2) – процесс линеаризации уравнений.

Величины x, y, z – координаты ИСЗ, сложно зависят от средних элементов орбит на эпоху T_0 : ω – аргумента перигея, n – среднего движения, Ω – долготы, i – угла наклона, e – эксцентриситета, M – средней аномалии. Координаты станции зависят от положения полюса X_p, Y_p . Поскольку величина ΔUT , учитывается при вычислении звездного времени по формуле: $S_{\oplus}(t + \Delta UT(t))$, то произведем замену $\Delta UT(t) \rightarrow \Delta S_{\oplus}(t)$ в рад.

Линейные соотношение между координатами x, y, z ИСЗ и элементами орбит запишем в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = C \begin{pmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\Omega \\ \Delta i \\ \Delta e \\ \Delta M \\ \Delta n \end{pmatrix}, \text{ где } C = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \omega} & \frac{\partial x}{\partial \Omega} & \frac{\partial x}{\partial i} & \frac{\partial x}{\partial e} & \frac{\partial x}{\partial M} & \frac{\partial x}{\partial n} \\ \frac{\partial y}{\partial \omega} & \frac{\partial y}{\partial \Omega} & \frac{\partial y}{\partial i} & \frac{\partial y}{\partial e} & \frac{\partial y}{\partial M} & \frac{\partial y}{\partial n} \\ \frac{\partial z}{\partial \omega} & \frac{\partial z}{\partial \Omega} & \frac{\partial z}{\partial i} & \frac{\partial z}{\partial e} & \frac{\partial z}{\partial M} & \frac{\partial z}{\partial n} \end{pmatrix} \quad (4)$$

а линейные соотношения для координат станции:

$$\begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = D \cdot \begin{pmatrix} \Delta x_p \\ \Delta y_p \\ S_{\oplus} \end{pmatrix}, \text{ где } D = \begin{pmatrix} \frac{\partial X}{\partial x_p} & \frac{\partial X}{\partial y_p} & \frac{\partial X}{\partial S_{\oplus}} \\ \frac{\partial Y}{\partial x_p} & \frac{\partial Y}{\partial y_p} & \frac{\partial Y}{\partial S_{\oplus}} \\ \frac{\partial Z}{\partial x_p} & \frac{\partial Z}{\partial y_p} & \frac{\partial Z}{\partial S_{\oplus}} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\text{так как } \frac{\partial x}{\partial \Omega} = \frac{\partial X}{\partial S_{\oplus}} = -y; \quad \frac{\partial y}{\partial \Omega} = \frac{\partial Y}{\partial S_{\oplus}} = x; \quad \frac{\partial z}{\partial \Omega} = \frac{\partial Z}{\partial S_{\oplus}} = 0$$

то второй столбец матрицы C и последний столбец матрицы D линейно зависимы. Отсюда невозможно одновременно определить $\Delta \Omega$ и ΔUT , поэтому на небольших интервалах времени ΔUT аппроксимируют линейной функцией

$$\Delta UT(t) = \frac{\Delta UT(t_0) + DR(t - t_0)}{86400},$$

здесь DR (сек/сутки) – вариационная продолжительность суток.

В этом случае вместо уравнений (5) используют уравнения вида

$$\begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = \bar{D} \begin{pmatrix} \Delta x_p \\ \Delta y_p \\ \Delta \dot{S}_{\oplus} \end{pmatrix}, \text{ где } \bar{D} = \begin{pmatrix} \frac{\partial X}{\partial x_p} & \frac{\partial X}{\partial y_p} & \frac{\partial X}{\partial \dot{S}_{\oplus}} \\ \frac{\partial Y}{\partial x_p} & \frac{\partial Y}{\partial y_p} & \frac{\partial Y}{\partial \dot{S}_{\oplus}} \\ \frac{\partial Z}{\partial x_p} & \frac{\partial Z}{\partial y_p} & \frac{\partial Z}{\partial \dot{S}_{\oplus}} \end{pmatrix}, \text{ а} \quad (6)$$

$$\dot{S}_{\oplus} = n_{\oplus} + \Delta \dot{S}_{\oplus}, \quad n_{\oplus} \approx 0,72921 \cdot 10^{-4} \text{ рад/сек} - \text{среднее движение,}$$

$\Delta \dot{S}_{\oplus}$ – поправка к принятому $n_{\oplus}$. Определим компоненты матрицы $\bar{D}$ в виде

$$\bar{D} = \begin{pmatrix} \frac{\partial X}{\partial x_p} = -z \cos S_{\oplus} & \frac{\partial X}{\partial y_p} = -z \sin S_{\oplus} & \frac{\partial X}{\partial \dot{S}_{\oplus}} = -y(t - t_0) \\ \frac{\partial Y}{\partial x_p} = -z \sin S_{\oplus} & \frac{\partial Y}{\partial y_p} = z \cos S_{\oplus} & \frac{\partial Y}{\partial \dot{S}_{\oplus}} = x(t - t_0) \\ \frac{\partial Z}{\partial x_p} = \bar{X} & \frac{\partial Z}{\partial y_p} = -\bar{Y} & \frac{\partial Z}{\partial \dot{S}_{\oplus}} = 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\text{здесь } t_0 - \text{момент, на который определяется ПВЗ, а } DR = -\frac{2\pi}{n_{\oplus}} \cdot \frac{\Delta \dot{S}_{\oplus}}{n_{\oplus}}.$$

Объединяя формулы (2), (4), и (6) получим условное уравнение МНК:

$$\rho_0(t) - \rho_c(t) = A \cdot C \begin{pmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\Omega \\ \Delta i \\ \Delta e \\ \Delta M \\ \Delta n \end{pmatrix} + B \cdot \bar{D} \begin{pmatrix} \Delta x_p \\ \Delta y_p \\ \Delta \dot{S}_{\oplus} \end{pmatrix} \quad (8)$$

в матрицах A , B , C , $\bar{D}$ – все частные производные известны, так как вычисляются по принятым начальным значениям средних элементов орбиты на эпоху T_0 :

$$\left. \begin{array}{cccccc} \omega & \Omega & i & e & M & n \\ x_p & y_p & \Delta UT(t) & & & \\ \bar{X} & \bar{Y} & \bar{Z} & & & \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{принятые} \\ \text{значения,} \end{array}$$

поправки $\Delta\omega$, $\Delta\Omega$, Δi , Δe , ΔM , Δn , Δx_p , Δy_p , $\Delta S_{\oplus}$ – вычисляются по наблюдениям на нескольких станциях в различные моменты времени.

По совокупности N условных уравнений строят M нормальных уравнений, соответствующих числу улучшаемых параметров

$$\sum_{i=1}^N \frac{\partial \rho_0(t)}{\partial P_k} \Delta \rho(t) = \sum_{j=1}^M \left(\sum_{i=1}^N \frac{\partial \rho_c(t)}{\partial P_k} \frac{\partial \rho_c(t)}{\partial P_j} \right) \Delta P_j \quad k=1, \dots, M \quad (9)$$

Поправки ΔP_j , вычисляемые из уравнений (9) добавляют к начальным значениям параметров P_j и повторяют процесс заново с момента вычисления ρ_c .

Таким образом, производят уточнение параметров орбит ИСЗ и вычисляют ПВЗ.

Заключение

Рассмотрен возможный алгоритм расчета ПВЗ по данным орбитальных систем ГЛОНАСС/GPS, использующий метод псевдодальномерных беззапросных измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.С.Толстиков. Оптимизация траекторных измерений. Материалы 6-ой Международной конференции, АПЭП-2002, т.3, с.125, 2002.
2. Е.В.Быханов. Определение ПВЗ по данным траекторных измерений навигационных ИСЗ ГЛОНАСС. 5-ый Российский симпозиум «Метрология времени и пространства» №5, с.81, 1994.

© Б.С. Могильницкий, В.М. Тиссен, А.С.Толстиков, 2005

ПАРАМЕТРЫ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ: ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ**Введение**

Целый ряд фундаментальных проблем по изучению таких явлений как движение полюсов Земли, неравномерность вращения Земли, изменение геопотенциала Земли, земные и океанские приливы, эффекты общей теории относительности и др. тесным образом связаны с проблемой определения параметров вращения Земли (ОПВЗ), решающей задачу пространственной ориентации Земли в космическом пространстве и дающей информацию о природе сил как внутри, так и вне планеты.

Параметры вращения Земли (ПВЗ) используются для решения задач координатных определений. Под ПВЗ понимаются следующие величины: всемирное время UT1 (фаза вращения Земли в точке наблюдения), координаты полюса X и Y, постоянные прецессии и нутации, а также длительность суток или модуль скорости вращения Земли. Полный набор ПВЗ определяет ориентировку Земли в пространстве.

В настоящее время ПВЗ в мире определяется с помощью различных технологий в рамках Международной службы вращения Земли : радиоинтерферометрии со свехдлинной базой (РСДБ), лазерной дальнометрии (спутниковой и лунной), спутниковой навигационной технологии (GPS/ГЛОНАСС). Другие технологии, которые сейчас апробируются - это лазерные гироскопы и сверхпроводящие гравиметры.

Государственная система определения ПВЗ

Государственная система ОПВЗ в России создана в 1985г. 1-й этап – использование существующих технических средств ОПВЗ и далее ввод новых средств, основанных на современных технологиях. Схема 1-го этапа включает в себя астрооптическую и спутниковую подсистему.

Астрооптическая подсистема образована на базе службы всемирного времени, действующей с 20-х годов, а с 1985 г Государственной службы ПВЗ. В настоящее время служба объединяет 10 обсерваторий в СНГ и 13 зарубежных. Наблюдения проводятся на 40 инструментах. В течение года определяется около 7000 поправок UT1 с СКП~15мс и около 6000 мгновенных значений широты с СКП~0. 15".

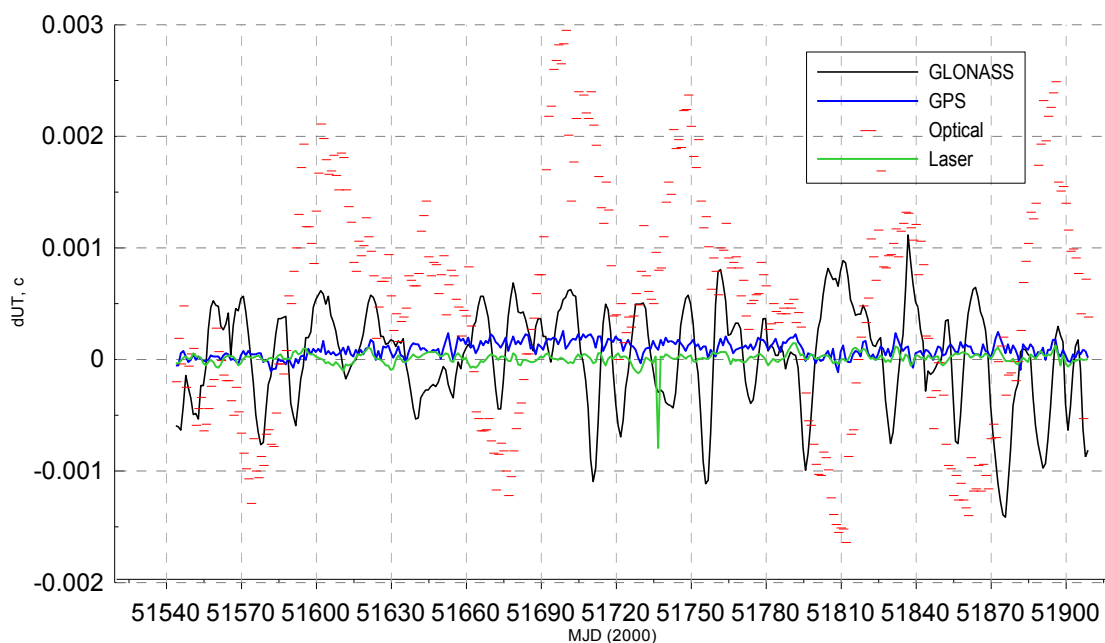


Рис. 1. Погрешности UT1, полученные различными технологиями

Не конкурируя по точности с современными технологиями, астрооптический метод обладает рядом преимуществ: в отличие от спутникового он обеспечивает абсолютное определение шкалы всемирного времени UT1 и до создания, освоения и введения в регулярную службу технологии РСДБ остается в нашей стране **ЕДИНСТВЕННЫМ** источником этих определений. Важна не случайная погрешность определения всемирного времени, а то, насколько устойчива остаточная систематическая погрешность астрооптической шкалы UT1. Для примера: обработка астрооптических данных ~ 6000 определений времени за 2000 г. дает значение систематической погрешности 0.2 мс (рис. 1), что сравнимо с погрешностью современных технологий.

Решение задачи определения ПВЗ состоит из двух весьма трудоемких этапов: 1) получение данных о ПВЗ и 2) обработка результатов измерений. Технологии получения данных о ПВЗ были рассмотрены в предыдущих работах [1,2]. Здесь рассматриваются вопросы, связанные с обработкой результатов определения ПВЗ.

Технологии обработки данных ПВЗ: АСТРООПТИКА

Методика обработки данных ПВЗ первоначально была разработана для астрооптической подсистемы. Из наблюдений прохождения звезд через местный меридиан определяется местное солнечное время T_m мгновенного меридиана места наблюдения и определяется Всемирное время $UT0 = T_m + \lambda$, λ – долгота места. Значения $UT0$, вычисленное из наблюдений разных обсерваторий не согласуются, т.к. не учитывается движение полюсов, влияющее на долготы пунктов наблюдения. Поэтому в вычислениях используются долготы **средних** меридианов посредством редукции изменения долгот из-за движения полюсов

$$\Delta\lambda = -(X \sin\lambda + Y \cos\lambda) \operatorname{tg}\varphi$$

и получают значение $UT1=UT0+\Delta\lambda$ - средневзвешенное из всех значений $UT1$, равное среднему солнечному времени на Гринвическом меридиане. Здесь $\Delta\lambda$ - поправка по долготу, φ - широта пункта наблюдения. $UT1$ определяется из данных наблюдений многих обсерваторий. Обработка результатов наблюдений основана на решении системы условных уравнений для каждой 1/20 части года

$$X \cos \lambda_i + Y \sin \lambda_i + Z = \varphi_i - \varphi_{0i}$$

$$(-X \sin \lambda_i + Y \cos \lambda_i) \operatorname{tg} \varphi_i + (UT1 - UTC) = UT0_i - UTC,$$

здесь $UT1$ - Всемирное время; $UT0_i$ - наблюденное Всемирное время;

UTC – координированное время; Z – неполярное изменение широты;

X, Y – координаты мгновенного полюса; λ_i, φ_i - координаты места наблюдения. Нижние индексы при λ_i, φ_i указывают на наличие нескольких пунктов наблюдений. Уравнения относительно X и Y решаются методом наименьших квадратов, их решения снова подставляются в указанные уравнения и находятся остаточные отклонения (невязки) в виде:

$$V(\varphi) = a + b \sin 2\pi\theta + c \cos 2\pi\theta + d \sin 4\pi\theta + e \cos 4\pi\theta,$$

$$V(\lambda) = a' + b' \sin 2\pi\theta + c' \cos 2\pi\theta + d' \sin 4\pi\theta + e' \cos 4\pi\theta,$$

где θ - доля года.

Коэффициенты при тригонометрических функциях определяются для каждого инструмента отдельно и используются для оценки стабильности и точности аппаратуры. Точность определения координат полюса и $UT1$ классическими способами, основанными на угловых измерениях, не превосходит $\pm 0,01''$ и $\pm 0,001''$ соответственно при осреднении данных за 5 суток. Существенное повышение ее ограничено, аномалиями атмосферной рефракции, ошибками звездных каталогов, систематическими и случайными погрешностями наблюдений. Кроме того, эти способы обладают недостаточной оперативностью.

Спутниковые методы оказались весьма эффективным средством для определения ПВЗ. При изучении движения полюсов на основе наблюдения ИСЗ высокие требования предъявляются к точности **прогнозирования** движения спутника. Чтобы повысить точность определения координат полюса, по сравнению с астрооптическими методами, необходимо положение спутника определять с погрешностью, в несколько см. Такая точность может быть достигнута спутниковыми лазерными и радиотехническими технологиями. Спутниковая подсистема в нашей стране базируется на средствах лазерной дальнометрии ИСЗ высшей и средней (ЛД-2) точности (3 станции в СНГ: Майданак, Евпатория, Тернополь) Комсомольск - на Амуре, Королев, средствах радиоконтроля орбит (РКО) аппаратов навигационной системы ГЛОНАСС. Определение ПВЗ спутниковым методом основаны на измерении топоцентрических расстояний до ИСЗ.

Лазерная дальнометрия

Методика определения ПВЗ лазерным методом состоит в следующем: если орбита спутника известна, а изменение координат пунктов наблюдений вызваны лишь движением полюса и неравномерным вращением Земли вокруг оси, то

между **вычисленными** и **измеренными** при наблюдениях ИСЗ параметрами (дальностями пункт-спутник) возникнут разности (невязки):

$$dr = r_n - r_s = -1/r_{ik} \{ [(X_c \cos S_{\oplus} + Y_c \sin S_{\oplus})z_k - Z_c x_k] v + [(X_c \sin S_{\oplus} - Y_c \cos S_{\oplus})z_k + Z_c y_k] u - [(x_k X_c - y_k Y_c) \sin S_{\oplus} + (y_k X_c - x_k Y_c) \cos S_{\oplus}] w \},$$

где X_c, Y_c, Z_c – координаты спутника, x_k, y_k, z_k – координаты пункта наблюдения в условной системе, r_n – наблюденная дальность, r_s – вычисленная дальность без учета параметров вращения земли, v, u, w – самолетные углы, $S_{\oplus}$ – среднее звездное время. В результате лазерных измерений с **нескольких** оптимально расположенных станций, используя данную систему уравнений, можно определить ПВЗ. Параметры ПВЗ заложены в матрицах перехода из условной системы координат (земной) к космической (квазизвездной) при расчете дальности пункт-спутник [3].

Наблюдение ИСЗ позволяет определять взаимное положение главной оси инерции и мгновенной оси вращения Земли, чего нельзя сделать астрооптическим методом. При этом ошибка в определении расстояния до ИСЗ не должна превышать 2-3 см. С такой же точностью должна быть известна орбита ИСЗ.

Достаточно эффективным методом определения координат полюса неравномерности вращения Земли является метод лазерной локации Луны. Технология обработки данных локации аналогична выше рассмотренной. Используется аналитическая зависимость между измеряемыми топоцентрическими дальностями: «наземный пункт наблюдения – отражатель на Луне» и элементами треугольника: «центр масс Земли – наземный пункт – отражатель на Луне». Кроме этого, должна быть представлена зависимость между земными системами координат, у одной из которых ось z направлена вдоль мгновенной оси вращения, а у другой – в МУН. Рассчитывается расстояние ρ между пунктом наблюдения и лунным отражателем посредством преобразования соответствующих систем координат, составляются разности между рассчитанными и измеренными расстояниями (невязки), производится линеаризация и составляется система уравнений поправок, где неизвестными будут являться координаты мгновенного полюса x_p, y_p и UT1-UTC. Метод лазерной локации Луны, кроме этого, позволяет уточнять элементы орбитального движения Луны, координаты отражателей на Луне, перемещение центра масс Земли и др.

Радиоинтерферометры со сверхдлинной базой (РСДБ)

Принцип метода космической геодезии для определения координат полюса и неравномерности вращения Земли в следующем: сигналы от радиоисточника за пределами нашей галактики (квазара) принимаются антеннами, удаленными друг от друга на тысячи км. Из-за сферичности поверхности Земли сигнал на антенну в пункте А поступит позже чем на антенну в пункте В. Не вводя в результаты измерений различных поправок и считая, что часы в пунктах А и В синхронны, эту временную задержку можно записать как $\tau = (d/c)\cos \theta$. Она определяет разность расстояний от квазара до приемных антенн в пунктах наблюдения в виде $\Delta r = c\tau = -\mathbf{d}^T \mathbf{e}_k$, здесь: модуль вектора $\mathbf{d}$ – длина базы АВ, θ –

угол между направлением на квазар и базой, c - скорость света, $\mathbf{e}_k$ - единичный вектор направления на источник . Фронт падающей волны плоский.

Переход от инерциальной (квазар) к земной (пункты наблюдения) системам координат приводит к уравнению, содержащему параметры вращения Земли на эпоху t

$$\Delta r_c = -\mathbf{d}^T \mathbf{R}_2(-x_p) \mathbf{R}_1(-y_p) \mathbf{R}_3(S_\oplus) \mathbf{e}_k$$

Введя разности координат концов базы Δx_{AB} , Δy_{AB} , Δz_{AB} в системе координат условного международного начала и сферические координаты α_k, δ_k инерциальной системы радиоисточника , получим

$$\Delta \bar{r}_0 = -(\Delta x_{AB} \Delta y_{AB} \Delta z_{AB}) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & x_p \\ 0 & 1 & -y_p \\ -x_p & y_p & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos S & \sin S & 0 \\ -\sin S & \cos S & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \delta_k & \cos \alpha_k & 0 \\ \cos \delta_k & \sin \alpha_k & 0 \\ \sin \delta_k & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

где $\mathbf{R}_2(-x_p)$, $\mathbf{R}_1(-y_p)$, $\mathbf{R}_3(S_\oplus)$ - известные матрицы преобразования координат, содержащие параметры вращения Земли. Добавляя сюда члены с ΔT -ошибку за счет рассинхронизации стандартов времени на пунктах в начальный момент T_0 , $cK(T-T_0)$ - поправку за относительный ход часов и считая, что координаты источников, параметры базы, ΔT и K известны с некоторой точностью, решают уравнение способом наименьших квадратов и ищут небольшие поправки к их заданным значениям. Используя уточненные значения искомым параметров вычисляют Δr_c и составляют разности $\Delta l = \Delta r_c - \Delta r$ (невязки). Решая эти уравнения (12 уравнений с 10-ю неизвестными: 6 координат источников, параметры базы d, θ а также ΔT и K) способом МНК, определяют поправки к известным координатам радиоисточников, к параметрам базы интерферометра, к ΔT и K , которые уточняют синхронизацию часов при телескопах и определяют $dt = u - d\alpha$. Если хорошо известна поправка $d\alpha$ к прямым восхождениям радиоисточников, то определяется поправка часов u , если же $d\alpha$ неизвестны, то наблюдая один и тот же радиоисточник ежедневно, определяют изменения скорости вращения Земли во времени. Этим методом межконтинентальные расстояния и координаты полюса определяются даже из суточной серии наблюдений с точностью до нескольких см, а всемирное время – до $1 \div 2$ мс. Этот метод позволяет проводить сличения показаний атомных стандартов частоты, разнесенных на большие расстояния с точностью ~10нс. Ему доступны объекты в большом диапазоне расстояний- от 10^6 м (ИСЗ) до 10^{26} м (квазары). Метод РСДБ обладает самым высоким угловым разрешением при позиционных наблюдениях.

Заключение

В работе сделан обзор способов вычисления ПВЗ по данным, получаемым как классическим, так и современными космическими технологиями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. B.S.Moghilnitsky, A.S.Tolstikov. Metrological aspects of optical and laser determinations of the EARTH rotation parameters. Proceedings of SPIE, v.4900, p.72, 2002.
2. Б.С.Могильницкий, А.С.Толстиков. Метрологические аспекты оптических и лазерных определений ПВЗ. Материалы 7-ой Международной конференции, АПЭП-2004, т.3, с.270, 2004.
3. В.К.Абалакин, И.И.Красноперов. Геодезическая астрономия и астрометрия, 1996.

© Б.С. Могильницкий, В.М. Тиссен, А.С. Толстиков, 2005

СИНТЕЗ СТАБИЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ КАЛМАНА В ЗАДАЧЕ УЛУЧШЕНИЯ ЭВО

Калмановская фильтрация является методом оптимальной обработки результатов измерений, искаженных помехами. Данный метод позволяет решить широкий круг задач: провести фильтрацию, интерполяцию, экстраполяцию, сглаживание непрерывных и дискретных сигналов; оценить параметры состояния при реализации алгоритмов оптимального управления в случаях, когда компоненты вектора состояния объекта не поддаются непосредственному измерению и др. [1, 2].

Применение фильтра Калмана в задаче улучшения ЭВО с целью фильтрации шума, исключения аномальных значений в составе измерений и восполнения пропущенных значений, является обоснованным. Но использование алгоритма классической калмановской фильтрации в данной задаче не всегда возможно. Основной проблемой являются вероятная потеря сходимости процесса оценивания и, как следствие этого, потеря работоспособности фильтра.

Расходимость фильтра может быть обусловлена разными причинами. В рассматриваемой задаче расходимость вызвана аномальными значениями в составе измерений и пропусками измерений. Потеря работоспособности фильтра происходит также и при подаче на его вход многомерного сигнала, не имеющего аддитивного шума хотя бы в одной проекции. Подобные трудности довольно часто возникают при решении разного рода прикладных задач.

Обозначенные проблемы устраняются при использовании идей и методов адаптации и регуляризации в алгоритмах классического фильтра Калмана [3, 4].

В конечном счете, синтез устойчивого фильтра Калмана сводятся к тому или иному способу определения и установки коэффициента усиления $K(k)$ фильтра. Потеря стабильности вызвана как раз тем, что вычисляемый по невязке

$$\sigma_z^2 = \|Z(k) - H(k)\tilde{x}(k)\|^2 \quad (1)$$

коэффициент усиления $K(k)$ фильтра становится ниже некоторого порогового значения. Из-за этого фильтр становится нечувствительным к дальнейшей динамике процесса. Компонентами невязки (1) являются:

$Z(k)$ – многомерный сигнал на входе фильтра;

$\tilde{x}(k)$ – сигнал на выходе фильтра (оценка выделяемого сигнала);

$H(k)$ – линейный оператор преобразования вектора сигнала $x(k)$, подлежащего оценке, в вектор сигнала $Z(k)$.

Сигнал на входе фильтра определяется следующим образом:

$$Z(k) = H(k)x(k) + \varepsilon(k), \quad (2)$$

где $\varepsilon(k)$ – аддитивная помеха (шум) в исходном сигнале.

Синтез стабильного фильтра Калмана в общем случае будет определяться следующим выражением:

$$\tilde{x}(k+1) = F(k+1, k)\tilde{x}(k) + K_a(k+1)E_u(k+1). \quad (3)$$

Предсказание $F(k+1, k)\tilde{x}(k)$ (3) получается как результат действия линейного матричного оператора на вектор оценки $\tilde{x}(k)$. Результатом будет оценка сигнала $\tilde{x}(k+1, k)$ (предиктор фильтра).

Коэффициент усиления $K_\alpha(k+1)$ (3) фильтра определяется по формуле

$$K_\alpha(k+1) = V_{\tilde{x}}(k+1, k)H^T(k+1)[\psi_\varepsilon(k) + \alpha E(k+1)]^{-1}, \quad (4)$$

где $V_{\tilde{x}}(k+1, k)$ – ковариационная матрица погрешности выходного сигнала (задается либо вычисляется); ψ_ε – ковариационная матрица шума входного сигнала; $E(k+1) = Z(k+1) - H(k+1)\tilde{x}(k+1, k)$ – вектор невязки; α – параметр регуляризации, минимизирующий невязку $\|E_u(k+1)\|^2$.

Ну и теперь главное. Невязка в выражении (3) есть

$$E_u(k) = E(k) + u(k), \quad (5)$$

где $u(k)$ – дискретный стационарный случайный сигнал, улучшающий статистические свойства фильтра и делающий его стабильным. Подобный алгоритм логичен. Если найти некоторую «наихудшую» модель помехи и построить для нее оптимальный фильтр, то этот фильтр обеспечит сходимость оценки полезного сигнала и для других помех.

При синтезе стабильных фильтров с привлечением методов регуляризации устойчивость решения имеет место в том случае, если погрешность результата обработки согласована с погрешностью исходных данных. В задаче формирования ЭВО это условие часто нарушается из-за наличия аномальных погрешностей (промахов, грубых ошибок, выбросов). Аномальные значения обычно выявляются и редактируются на этапе предварительной обработки, однако возникают ситуации, когда аномальные результаты носят скрытый характер. Такое скрытое засорение выборки трудно идентифицируемо и может привести к серьезному изменению свойств оценок.

Обеспечить устойчивость фильтра к аномальным выбросам можно введением параметра регуляризации, определяемого соотношением

$$\alpha(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2(k) \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i^2(k) \right]^{-1}, \quad (6)$$

где $e_i(k)$ – компоненты вектора невязки $E(k)$; $z_i(k)$ – компоненты вектора $Z(k)$.

Оценка $\alpha(k)$ управляет интенсивностью шума $u(k)$ и коэффициентом усиления фильтра.

Для восполнения пропущенных значений в измерениях, в данной задаче используется следующий подход. На каждой итерации предварительно анализируется величина входного сигнала. При равенстве нулю хотя бы одной проекции, какого значения в составе наших измерений явно не может быть (дальность до спутника не может быть нулевой), на выход фильтра поступает лишь сигнал с его предиктора, но с одним немаловажным условием. Прогноз подается не в чистом виде, а искусственно зашумляется, чтобы фильтр не начал расходиться по собственному прогнозу. Характер искусственного шума должен

соответствовать характеру реальных помех в измерениях. Априорная информация является ключевым условием для синтеза данного фильтра.

В качестве экспериментального сигнала, подаваемого на вход фильтра, в работе используется рассчитанный трек псевдодальностей $X(t)$ для одного спутника относительно одной измерительной станции на конечном интервале времени $t \in [1; 15000]$.

Исходный сигнал $X(t)$ дискретизируется с шагом $\Delta=1$ с (сигнал X_k) и искажается случайным шумом с нормальным законом распределения. Моделируются аномальные выбросы измерений и пропуски. В итоге получаем сигнал для экспериментальной обработки X_{pi} , имитирующий реальные измерения (рис. 1).

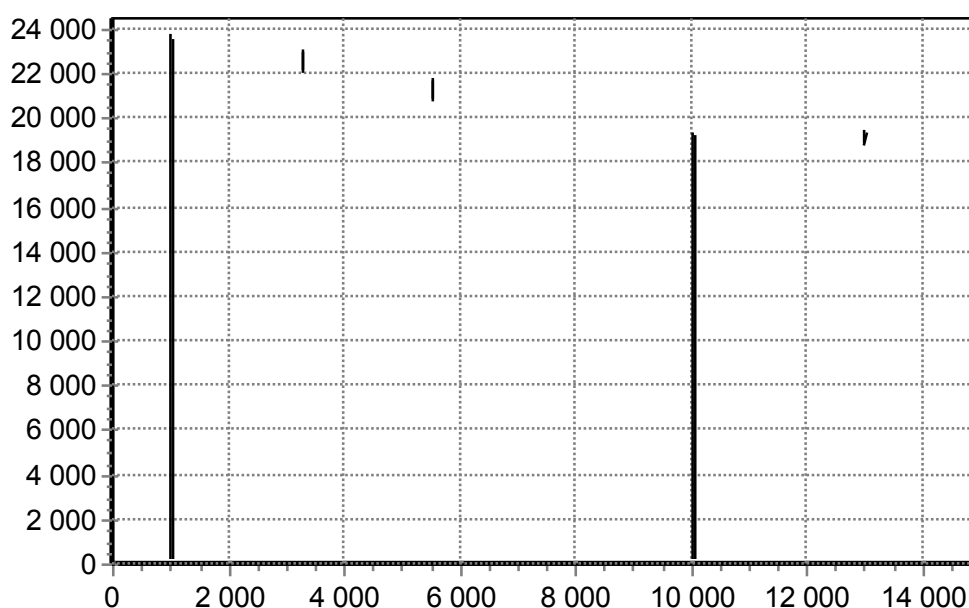


Рис. 1. Зашумленный сигнал на входе фильтра

Эксперимент показал, что классический вариант фильтра Калмана начал расходиться на самом первом пропуске в измерениях ($t = 1000$ с). Чтобы проанализировать влияние аномальных значений на обычный фильтр, был убран первый пропуск сигнала на интервале $t \in [1000; 1050]$. Данный алгоритм оказался непригодным и для фильтрации выбросов. На рис. 2 представлена относительная ошибка оценивания классическим фильтром Калмана одной из проекций сигнала в процентах. Аномальный выброс в момент времени $t=3268$ с вызвал расходимость процесса оценивания.

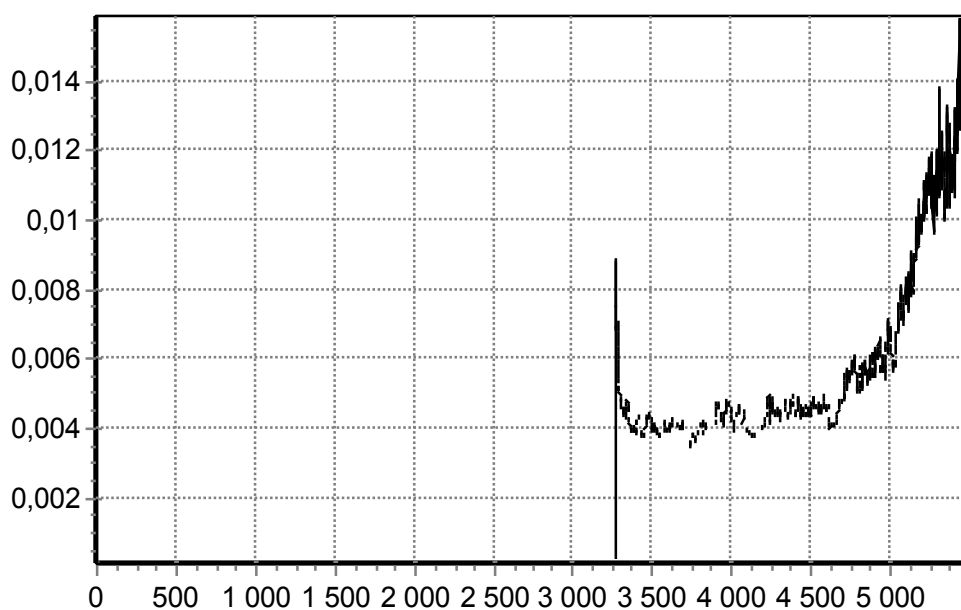


Рис. 2. Относительная ошибка оценивания классического фильтра (%)

Модифицированный стабильный фильтр Калмана успешно обработал все три скачка в измерениях и два интервала пропусков, но недостатком стала несколько увеличенная относительная ошибка оценивания на всем интервале. В абсолютных единицах максимальная величина ошибки на исследуемом интервале составила порядка 10 м. Классический фильтр Калмана дает ошибку порядка 4 см.

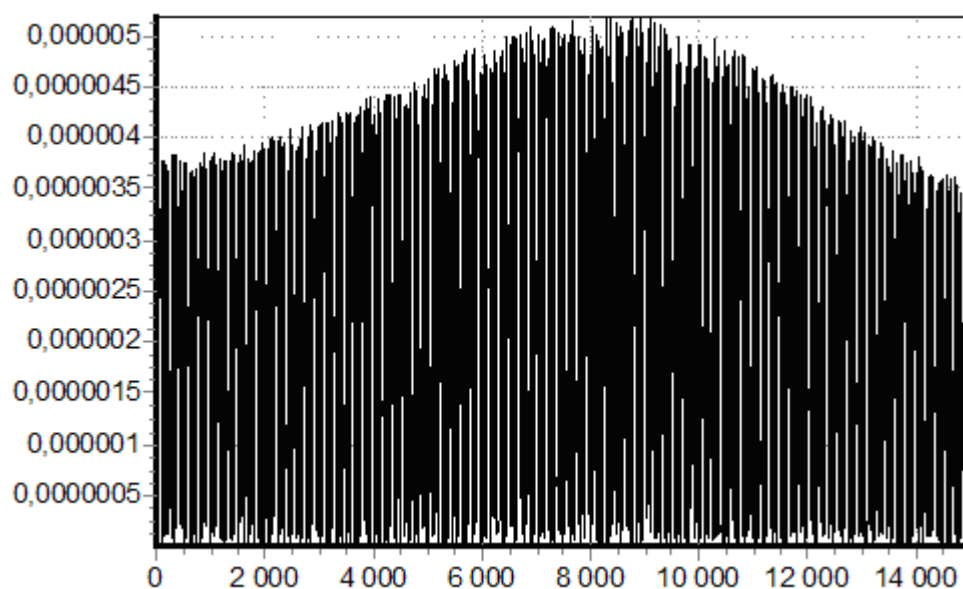


Рис. 3. Относительная ошибка оценивания стабильного фильтра Калмана (%)

Рассмотренный в работе алгоритм сочетает в себе схемы регуляризованного и робастного фильтров Калмана. В алгоритм дополнительно внедрен элемент адаптивного фильтра, работающего по собственному прогнозу. Фильтр является сугубо прикладным и оптимальным в рамках данной задачи.

Он является стабильным, но немного проигрывает по точности классическому фильтру Калмана.

Работа служит наглядным примером того, что те или иные модификации фильтров применяются исходя из предварительного анализа обрабатываемых измерений. Например, использование данного подхода для обработки зашумленного сигнала без пропусков и аномальных значений не оправдано, т.к. несет в выходной сигнал необоснованную составляющую погрешности.

Предложенный подход не является единственным в своем роде. Существуют и другие модификации фильтров. Авторы работы исследовали и применили комбинированный вариант фильтра для улучшения его стабильности и устойчивости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воскобойников Ю. Е. Рекуррентное оценивание в динамических системах. Учеб. пособие – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 92 с.
2. Фомин В.Н. Рекуррентное оценивание и адаптивная фильтрация. М.: Наука, 1984. 288с.
3. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация / А.Н. Тихонов, А.В. Гончарский, В.В. Степанов, А.Г. Ягола. М.: Наука, 1983. 200с.
4. Сотсков Б.М., Щербаков В.Ю. Теория и техника Калмановской фильтрации при наличии мешающих параметров // Зарубежная радиоэлектроника. 1985. №2. С.3-29.

© А. С. Толстиков, А. Г. Ханин, 2005

УДК 536.6 (031)

В.Я. Черепанов

ФГУП «СНИИМ», Новосибирск

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Тепловое поле недр Земли является результатом сложного взаимодействия внутренних источников тепла с внешними источниками или приемниками тепловых потоков, такими как Солнце и космос. С точки зрения теории теплообмена интенсивность этого взаимодействия определяется не только теплопроводностью пород земной коры и конвективным теплообменом ее поверхности с атмосферой, но и радиационным теплообменом, интенсивность которого зависит от терморadiационных свойств земной поверхности [1].

К таким характеристикам относятся, прежде всего, коэффициенты теплового излучения (излучательная способность или степень черноты). Наиболее надежным способом определения этих характеристик является их измерение. В данной работе рассматриваются разработанные ФГУП «СНИИМ» пути повышения точности и возможности метрологического обеспечения измерений коэффициентов теплового излучения различных материалов.

Известно [2], что плотность потока теплового излучения нечерного, реального тела зависит не только от его температуры, длины волны или диапазона длин волн, но и от свойств материала, а также от состояния и формы излучающей поверхности. Поэтому, если рассматривать тепловое излучение реального тела в очень узком диапазоне длин волн, то близость интенсивности

такого излучения к излучению « абсолютно черного тела» при тех же длинах волн характеризуют монохроматическим коэффициентом теплового излучения ε_λ . Если аналогично рассматривать весь спектр излучения, то он характеризуется интегральным коэффициентом теплового излучения ε_t . Для характеристики излучения, идущего по всем направлениям от реально нагретой поверхности, используют термин полусферический коэффициент теплового излучения ε_h , а идущего перпендикулярно к излучающей поверхности – нормальный коэффициент теплового излучения ε_n .

Сочетание этих понятий дает три важных для практических применений коэффициента теплового излучения: ε_{th} – интегральный полусферический, ε_{tn} – интегральный нормальный и $\varepsilon_{\lambda n}$ – монохроматический нормальный.

Коэффициент ε_{th} определяет теплообменные свойства поверхностей материалов, а коэффициенты $\varepsilon_{\lambda n}$, ε_{tn} используют для введения поправок на «нечерноту» тел при измерениях температуры нагретых поверхностей монохроматическими или радиационными пирометрами и тепловизорами. Расчет тепловых потоков с поверхностей объектов обычно ведут на основе справочных данных по ε_{th} , а результаты измерений температуры поверхности этих же объектов основаны на данных по $\varepsilon_{\lambda n}$ (измерения монохроматическим пирометрами или тепловизорами) или ε_{tn} (измерения радиационными пирометрами).

Насколько же отличаются коэффициенты ε_{th} и ε_{tn} для одного и того же вещества (материала)? Однозначного ответа нет, прежде всего, из-за плохой сопоставимости данных, полученных на разных измерительных установках, разными методами и на различных образцах. Погрешность таких измерений обычно составляет более 5%. Для наиболее изученных полированных металлов, таких как вольфрам, тантал, молибден, платина и никель расхождения ε_{th} и ε_{tn} составляют до 20% при сравнительно низких температурах и, как правило, менее 5% при температурах, близких к плавлению этих металлов.

Кроме того есть основание считать, что эти расхождения становятся малыми при больших значениях коэффициентов ε_{th} и ε_{tn} . Следовательно, для многих пород и строительных материалов, имеющих значение коэффициентов теплового излучения, близкие к 0,9, это правило выполняется, хотя точного подтверждения этому нет. Таким образом сложившаяся ситуация показывает, что единственным надежным способом определения ε являются не «справочные данные», которые сами по себе приведены зачастую с большой погрешностью и не гарантируют надежной идентификации поверхностей различных материалов, а измерение ε реальных поверхностей. Рассмотрим основные методы таких измерений.

Калориметрический метод предназначен для измерений интегрального полусферического коэффициента теплового излучения ε_{th} и основан на закономерностях теплообмена, в которых участвуют два тела, имеющих разные температуры. Интенсивность теплообмена (плотность теплового потока) q_ε определяется по закону Стефана-Больцмана

$$q_\varepsilon = \varepsilon_{th} \sigma (T_1^4 - T_2^4), \quad (1)$$

где ε_{th} – эффективный коэффициент теплового излучения поверхности тел ($0 < \varepsilon < 1$), σ – постоянная Стефана – Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²•К⁴); T_1 , T_2 – абсолютные температуры поверхностей тел, (К). Для измерения ε_{th} , нагретый образец помещают в замкнутую оболочку, находящуюся при значительно более низкой температуре ($T_1^4 \gg T_2^4$) и имеющую значительно большую площадь поверхности, чем образец. В этом случае интенсивность теплообмена определяется только коэффициентом ε_{th} образца. При этом, кроме того, вторым слагаемым в формуле (1) можно пренебречь и получить формулу для определения ε_{th} калориметрическим методом [2]

$$\varepsilon_{th} = q_{\varepsilon} / \sigma T_1^4 \quad (2)$$

Схема тепловой ячейки для реализации метода приведена на рис. 1.

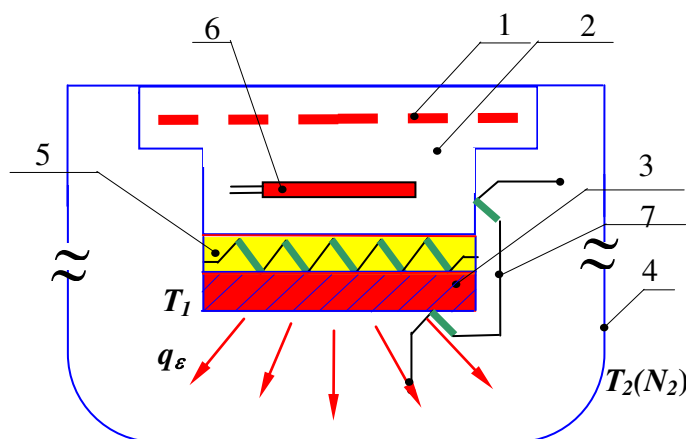


Рис.1. Тепловая ячейка для измерения ε_{th} теплотметрическим методом:

1 – нагреватель, 2 – термостатированный блок, 3 – образец, 4 – корпус вакуумной камеры, 5 – тепломер, 6 – основной термометр, 7 – дифференциальная термопара.

Поток теплового излучения плотностью q_{ε} создается нагревателем 1, расположенным внутри термостатированного блока 2. При наступлении стационарного температурного режима ($dT_1/d\tau = 0$) тепловой поток, идущий от нагревателя, рассеивается с поверхности образца 3 к стенкам корпуса вакуумной камеры 4, температура T_2 которой поддерживается значительно более низкой, чем T_1 , например, при температуре кипящего азота (≈ -196 °С).

Значение теплового потока определяют по измерениям мощности нагревателя или сигнала тепломера 5. При использовании тепломера метод называют **теплотметрическим** [4].

В термостатированном блоке расположен основной термопреобразователь 6 – носитель температурной шкалы, который с учетом поправки, определяемой дифференциальной термопарой 7 измеряет значения температуры поверхности образца. Для этого один измерительный спай термопары располагают на поверхности образца, другой – на поверхности термопреобразователя.

Измерительные установки, реализующие калориметрический метод, были созданы в СНИИМ с целью создания исходных средств для метрологического обеспечения измерений ε_{th} в диапазоне температур от -100 до 650 °С. С помощью этих установок исследованы температурные зависимости ε_{th} целого ряда материалов и покрытий в диапазоне значений от $0,1$ до $0,95$ с погрешностью $1 \div 2,5$ %. Результат исследований – рекомендация нескольких материалов и покрытий в качестве стандартных образцов ε_{th} .

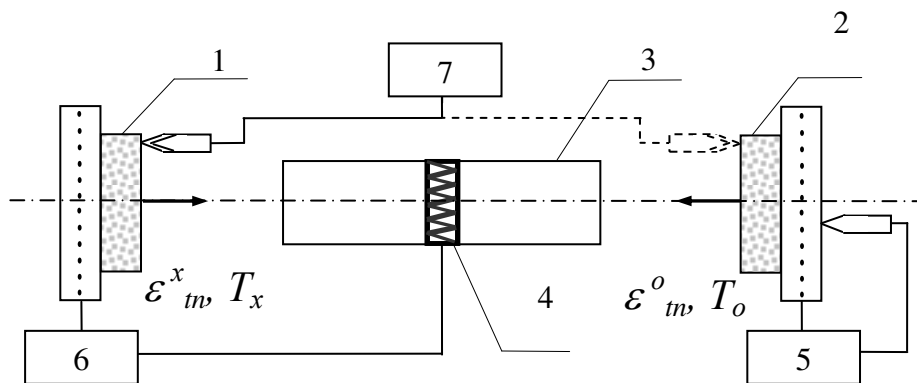


Рис.2. Компаратор излучательных свойств:

1 – исследуемый образец с нагревателем, 2 – стандартный образец с нагревателем, 3 – дифференциальный радиометр, 4 – тепломер, 5 – регулятор температуры стандартного образца, 6 – регулятор температуры исследуемого образца, 7 – термометр

Для исследования стабильности и определения температурной зависимости ε_{th} , необходимых для поиска стандартных образцов, в СНИИМ разработан компаратор излучательных свойств [5] (рис. 2), который содержит плоские нагреватели с исследуемым 1 и стандартным 2 образцами материалов, расположенные на одной оптической оси по разные стороны дифференциального радиометра 4 специальной конструкции. Чувствительным элементом радиометра является дифференциальный преобразователь теплового потока (тепломер) 4, выполняющий функцию нуля-индикатора равенства плотностей тепловых потоков q_x и q_o , соответственно, от исследуемого и стандартного образцов. Температура T_o стандартного образца с известным значением ε_{th}^o задается и поддерживается постоянной с помощью регулятора 5. Температура T_x исследуемого образца с искомым значением ε_{th}^x устанавливается с помощью регулятора 6 по нулевому сигналу тепломера 4, что соответствует равенству значений q_x и q_o .

Точные значения температур образцов измеряют специально разработанным термоэлектрическим термометром 7 со следящей компенсацией теплоотвода по термоэлектродам.

Искомое значение нормального коэффициента теплового излучения исследуемого образца рассчитывают по формуле

$$\varepsilon_{th}^x = \varepsilon_{th}^o T_o^4 / T_x^4. \quad (3)$$

Погрешность компарирования коэффициентов излучения составляет $1,5 \div 2,5$ % для значений ε_m от 0,2 до 1,0 при температурах $100 \div 650^\circ\text{C}$.

Для повышения точности измерений ε_m^x необходимы надежные данные по ε_m^o стандартного образца. С этой целью в СНИИМ был разработан излучатель типа «черное тело» с контролируемым значением коэффициента теплового излучения. Принцип действия такого излучателя основан на использовании полукрытой адиабатической оболочки. Устройство излучателя представлено на рис. 3. Оно содержит никелевый блок 1 в виде АЧТ с нагревателем 2. Блок с одной торцевой и боковой поверхностями окружен адиабатической оболочкой 3, температура T_2 которой поддерживается равной температуре T_1 блока с помощью дифференциальной термопары 4. Значения температур $T_1 = T_2$ при этом измеряют термометром 5, являющимся носителем температурной шкалы.

В стационарном режиме, выделяемая нагревателем блока АЧТ мощность P , полностью рассеивается в виде теплового потока плотностью q_ε . При этом с учетом закона Стефана-Больцмана справедливо соотношение

$$\varepsilon_m = \frac{P}{\sigma T_1^4 F}, \quad (4)$$

где F – площадь наружного сечения выходного отверстия АЧТ.

Такой излучатель воспроизводит значения ε_m в диапазоне $100 \div 600^\circ\text{C}$ с погрешностью $1 \div 1,5$ %.

На основе рассмотренных прецизионных средств измерения полусферического и нормального интегральных коэффициентов теплового излучения подготовлен проект государственной поверочной схемы для значений ε_{th} и ε_m в диапазоне $0,10 \div 0,99$, в котором эти средства предложены для использования в качестве установок высшей точности, компаратора и стандартных образцов (мер), обеспечивающих воспроизведение и передачу размера единиц этих важнейших терморadiационных характеристик материалов.

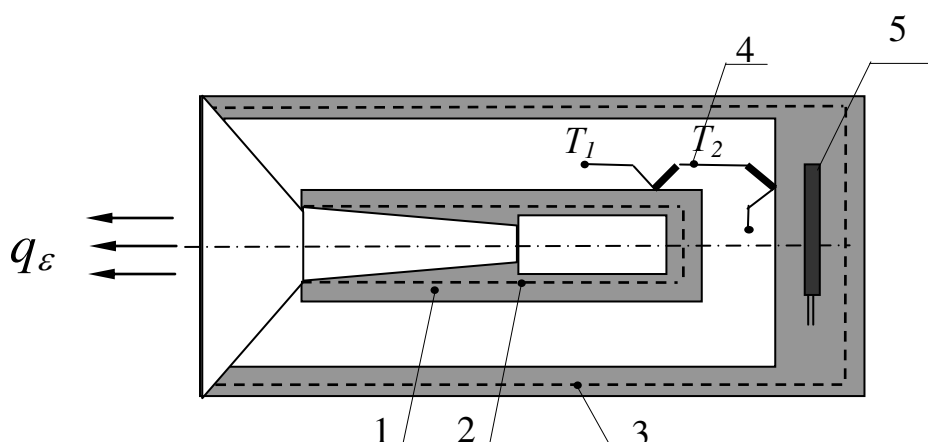


Рис.3. Излучатель «черное тело» с контролируемым коэффициентом теплового излучения:

1 – модель АЧТ, 2 – нагреватель, 3 – адиабатический экран, 4 – дифференциальная термопара, 5 – основной термометр.

Однако прекращение в последние годы серийного выпуска отечественных терморадиометров и свертывание работ по созданию и исследованию свойств новых конструкционных материалов приостановило внедрение поверочной схемы. В настоящее время решение вопросов, прежде всего, энергосбережения и энергоаудита требует надежных данных по терморadiационным характеристикам материалов. В связи с этим создание современных технических средств приборного и метрологического обеспечения измерений этих характеристик становится вновь актуальным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тепловое поле недр Сибири/ Дучков А.Д., Лысак С.В., Балобаев В.Т. и др./ Новосибирск, Наука, 1987, 196 с.
2. Излучательные свойства твердых материалов. Справочник. Под общ. ред. А.Е.Шейндлина. М., «Энергия», 1974, 472 с.
3. Мисяченко И.И., Черепанов В.Я. Измерительная установка для исследования и аттестации стандартных образцов излучательных свойств. /В сб.: Вопросы авиационной науки и техники. Авиационные материалы. Оптико-физические свойства материалов. М., ВИАМ, 1989, с. 44-49.
4. Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Воробьев Л.И., Гайдучек А.В. Калориметрический метод и устройство для определения терморadiационных характеристик энергосберегающих материалов и покрытий/ Пром. теплотехника, т. 24, № 2-3, с. 159-164.
5. Cherepanov V. Metrological problems of heat exchange parameters measurements on the solid surface/ IMECO-TC 12 Workshop on "Surface thermal measurements". Budapest, 1995, с. 111-118.

© В.Я. Черепанов, 2005

УДК 351.821

Ю.А. Пальчун, Г.Г. Егиазарян

ФГУП «СНИИМ», Новосибирск

А.Н. Енин

СГГА, Новосибирск

В.И. Серых

НГТУ, Новосибирск

РЕЗУЛЬТАТИВНОСТЬ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ И ИХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ СЛУЖБ

В настоящее время остро стоят вопросы оценки результативности как систем менеджмента качества предприятий, так и их метрологических служб.

При решении этих вопросов предлагаются соответствующие варианты оценки с использованием различных балльных систем.

Недостатки предлагаемых подходов заключаются в следующем.

1. Не удастся создать объективные математические модели таких оценок.
2. Оцени, в большинстве случаев, носят субъективный характер и отданы на откуп экспертов, осуществляющих эту деятельность.
3. Оценки носят многопараметрический характер и требуют длительного времени анализа. Это приводит к тому, что оценка результативности в лучшем случае осуществляется один раз в течение полугода.
4. Предлагаемые подходы к оценке результативности не используют соответствующие измерительные процедуры и измерительную аппаратуру и апробированные в конкретных разработках критерии, что опять приводит к их необъективности.
5. Отсутствуют критерии и однозначные подходы к декомпозиции графических моделей систем.

В докладе предлагается подход к оценке результативности, базирующийся на хорошо отлаженных методах оценки надежности продукции предприятий и, в частности, предприятий оборонных областей.

Особенность предлагаемого подхода заключается в следующем.

1. Используется однопараметрический подход к оценке результативности.
2. Оценку результативности предлагается вести с использованием хорошо разработанных методов теории надежности. При этом не требуется разработка соответствующей измерительной аппаратуры и методов контроля, а используются хорошо проработанные и широко уже используемые на каждом из предприятий методы контроля.
3. Имеется возможность использования расчетных методов расчета надежности и сравнения полученных результатов с экспериментальными.
4. Используются хорошо документированные подходы (в частности, в области “Закона об обеспечении единства измерений”) как к выбору контролируемых параметров, так и к выбору измерительной аппаратуры. Кроме того, все эти подходы уже широко используются предприятиями и не требуют экспериментальной проверки.
5. Использование в предлагаемых подходах методов теории направленных графов позволяет получить математические модели процессов производства и

их метрологического обеспечения с последующим получением для этого количественных критериев.

6. Используемые подходы позволяют получить объективную и оперативную оценку результативности и вести оперативное управление процессом производства, как того и требуют ГОСТы серии 9000 версии 2000 года и ГОСТ Р ИСО 17025.

7. Предлагаются четкие и однозначные критерии декомпозиции моделей систем.

В докладе проводится анализ предлагаемых подходов и методов, рассматриваются математические модели процессов производства и метрологического обеспечения.

При создании математических моделей на первом этапе предлагается использование структурных схем производства (ландшафтное моделирование). Особенность здесь заключается в том, что, как это и рекомендуют ГОСТы серии 9000 версии 2000 года, при построении таких схем используется процессный и системный подход. На втором этапе, с использованием методов теории графов, получают графическую модель производства (предприятия). Далее осуществляется раскрытие графа с использованием стандартных процедур. Особенность этого раскрытия заключается в определении необходимых коэффициентов передачи. При этом модель строится таким образом, чтобы была возможность экспериментального контроля коэффициентов передачи отдельных элементов структурных схем.

© Ю.А. Пальчун, А.Н. Енин, Г.Г. Егиазарян, В.И. Серых, 2005

УДК 006.083

А.Н. Енин

СГГА, Новосибирск

ВЫБОР КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

В настоящее время все больше предприятий и организаций внедряют в практику деятельности международные стандарты серии ИСО 9000 версии 2000 года. Основой требований этих стандартов является процессный подход к разработке, внедрению и поддержанию в рабочем состоянии систем менеджмента качества (СМК), направленных, в первую очередь, на повышение удовлетворенности потребителей за счет создания качественной продукции с определенными свойствами. Применительно к радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) одной из характеристик, отражающей свойство продукции, является надежность. Для того чтобы убедить потребителя в достоверности информации о качестве поставленной продукции, а также иметь эту информации при ее создании, производителю необходимо иметь объективные методы оценки надежности изделий, основанные на точных измерениях. Без точных измерений невозможно обеспечить высокое качество и требуемую надежность изготавливаемой продукции. Причем удельный вес измерительных операций, задействованных в технологических процессах производства РЭА, возрастает в зависимости от сложности изделий. Для контроля качества при производстве

РЭА на всех стадиях процесса производства часто используется сложная измерительная техника, применение которой обуславливает выбор контролируемых (измеряемых) параметров надежности составных частей (электронных компонентов, собранных на них плат, узлов, блоков) и изделия в целом.

В соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 9001-2001 [1] для повышения удовлетворенности потребителей предприятия, разрабатывающие и выпускающие РЭА, должны определять критерии и методы, необходимые для обеспечения результативности процессов, задействованных в СМК. Для оценки результативности процессам СМК необходимо выбрать соответствующие характеристики, для которых необходимо определить контролируемые (измеряемые) параметры. Обоснованность и правильный выбор контролируемых (измеряемых) параметров является основой при определении соответствующих методик измерений и контрольных операций технологического процесса. В свою очередь, достоверность полученной информации при проведении измерений является залогом объективной оценки результативности процессов производства и, как следствие, обоснованного применения соответствующих воздействий на технологический процесс и конструкцию изделия для улучшения качества и надежности выпускаемой продукции. Ассоциативная связь вышеприведенных понятий в рамках СМК приведена на рис. 1.

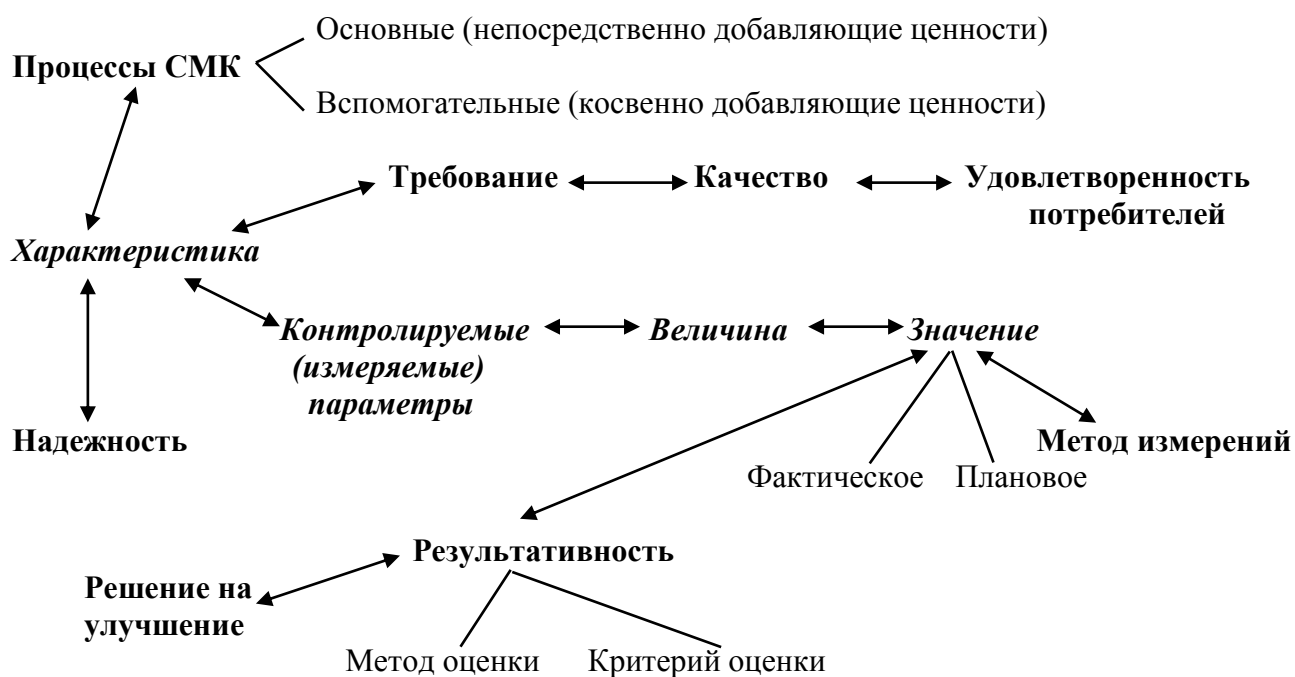


Рис. 1

Выбор контролируемых (измеряемых) параметров процессов для оценки надежности составных частей и изделия в целом, методик измерений, средств измерений и соответствующих контрольных операций технологического процесса осуществляется на стадиях разработки, уточняется при производстве продукции и может включать следующие этапы:

- Проверку наличия обоснований выбора состава контролируемых (измеряемых) параметров, по которым будет определяться надежность;
- Выбор методик измерений контролируемых (измеряемых) параметров;
- Выбор контрольных операций технологического процесса, в которых задействованы процессы измерений;
- Оценку правильности обоснований выбора состава контролируемых (измеряемых) параметров;
- Оценку правильности выбора состава контролируемых (измеряемых) параметров;
- Оценку правильности выбора методик измерений контролируемых (измеряемых) параметров и контрольных операций технологического процесса, в которых задействованы процессы измерений выбранных контролируемых (измеряемых) параметров.

Выбор состава контролируемых (измеряемых) параметров, а также соответствующих им методик измерений и контрольных операций технологического процесса проводится на этапах эскизного и технического проектов в процессе разработки изделий. Основные этапы выбора состава контролируемых (измеряемых) параметров и соответствующие им методики измерений и контрольные операции технологического процесса приведены на рис. 2.

Оценка правильности обоснования выбора состава контролируемых параметров состоит в оценке полноты и правильности выполнения разработчиком операций 1–8.

Работы по выбору контролируемых (измеряемых) параметров могут включать:

- Оценку выбранных задач системы измерений (контроля);
- Оценку состава выбранных (сформированных) параметров, подлежащих контролю (измерению) применительно к задачам системы измерений и соответствующий критерий их выбора – "да (учитывается, подлежит измерению)" или "нет (не учитывается, измерению не подлежит)";
- Оценку системы (способа) контроля.

Задачи системы измерений (контроля) составных частей и изделия в целом могут включать решение таких вопросов как:

- Контроль функционирования;
- Контроль технического состояния;
- Настройка, регулировка, юстировка, калибровка;
- Поиск отказов;
- Прогнозирование технического состояния на стадиях технологического процесса и в ходе эксплуатации.

– Предел суммарной абсолютной погрешности измерений.

Система измерений (контроля) выбранных параметров включает такие способы как непрерывный или периодический контроль, а также контроль по требованию.

Основными методами выбора контролируемых (измеряемых) параметров могут служить:

1. Метод, основанный на оценке надежности РЭА, который применим для выбора параметров в задачах контроля технического состояния аппаратуры [2];

2. Метод, основанный на оценке показателя качества надежности РЭА, который применим для выбора параметров в задачах контроля технического состояния аппаратуры [3, 4];

3. Метод, основанный на анализе модели аппаратуры, который применим для выбора параметров в задачах контроля технического состояния и поиска отказов [5];

4. Метод, учитывающий производственные параметры, который применим для задач прогнозирования технического состояния РЭА [6];

5. Метод, основанный на анализе топологической модели аппаратуры, который применим для выбора контролируемых параметров для оценки работоспособности аппаратуры [7].

Оценка правильности выбора контролируемых параметров проводится в процессе приемки технического проекта, разработки рабочей конструкторской и технологической документации, проведения испытаний опытного образца разрабатываемого изделия.

Оценка правильности выбора методик измерений состоит в оценке правильности назначения допустимых отклонений контролируемых параметров, оценки единства измерений и достоверности контроля параметров, а также целесообразности разработки новых методик измерения параметров для оценки надежности (блок 9 на рис. 2).

Выбор контрольных операций технологического процесса, в которых задействованы процессы измерений выбранных контролируемых (измеряемых) параметров, а также соответствующие средства измерений, осуществляется на этапе разработки конструкторской и технологической документации в ходе разработки изделий. В ходе промышленного производства, в зависимости от изменений, вносимых в конструкцию и технологию изготовления изделий, состав контрольных операций может уточняться.

Оценка правильности выбора средств измерений состоит в оценке качества средств измерений, а также в оценке правильности решения вопросов поверки (калибровки) средств измерений (блок 10 на рис. 2).

Оценка правильности выбора контрольных операций, в которых задействованы процессы измерений, состоит в оценке качества системы измерений и контроля, полноты охвата процессами измерений контролируемых параметров по всему технологическому циклу, а также оценки полноты и правильности изложения вопросов метрологического обеспечения в конструкторской и технологической документации (блок 11 на рис. 2).

Таким образом, представленные в статье подходы к выбору контролируемых (измеряемых) параметров помогут решить вопросы обеспечения результативности процессов производства через оценку надежности выпускаемой продукции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р ИСО 9001–2001. Системы менеджмента качества. Требования. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
2. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы. М.: Энергия, 1974.
3. Евланов Л.Г. Контроль динамических систем. М.: Наука, 1973.
4. Радиотехнические системы/ Под ред. Ю.М. Казаринова. М.: Советское радио, 1968.
5. Гурин А.И., Кострикин А.И., Яринич Л.А. Логический поиск неисправностей. Моск. обл.: ИПК "Машприбор", 1996.
6. Гаскаров Д.В., Мозгалецкий А.В. Техническая диагностика (непрерывные объекты). М.: Высшая школа, 1975.
7. Методика выбора диагностических параметров для проверки работоспособности непрерывных объектов, представленных топологическими моделями, с учетом непрерывности проверок. ВНИИНМАШ, Горьковский филиал, 1980.

© А.Н. Енин, 2005

УДК 681.787:53.082.54

И.Н. Карманов, Н.А. Мещеряков

СГГА, Новосибирск

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ УВЛАЖНЕННОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для математического описания полученных экспериментальных зависимостей степени поляризации рассеянного материалом лазерного излучения от увлажненности образца используем линейную модель вида

$$P(q) = Aq + P_0,$$

где P – степень поляризации излучения, рассеянного увлажненным материалом;

P_0 – степень поляризации излучения, рассеянного сухим материалом;

A – постоянный коэффициент.

q – относительная увлажненность материала, определяемая формулой:

$$q = \frac{Q}{m_0} = \frac{m - m_0}{m_0},$$

где Q – масса влаги в образце;

m_0 – масса сухого образца;

m – масса образца вместе с влагой.

Так как диффузность исходных экспериментальных данных значительна, наиболее широко используемый метод линейной аппроксимации – метод наименьших квадратов (МНК) – может дать неадекватные результаты [1]. В этих условиях целесообразно использовать другие методы построения оптимальной прямой, например, метод медианных центров (ММЦ), также описанный в [1]. Сущность этого метода заключается в том, что обведенное контуром поле точек делят на несколько частей, и в каждой из них находят медианный центр, т. е. пересечение вертикали и горизонтали слева и справа, и

выше и ниже которых оказывается равное число точек. Затем через эти медианные центры проводят плавную кривую. Так как общее число отсчетов, как правило, не очень велико, то не следует стремиться к разделению поля точек на излишне большое число областей. Так, если поле точек, как в нашем случае, решено описать прямой линией, для определения положения которой достаточно двух медианных центров, то и поле точек нужно разделить только на две равноценные области.

Быстрая оценка коэффициента корреляции и погрешности исходных данных также может быть произведена методом медианных центров. Для этого обведенное прямоугольным контуром поле исходных данных (рис. 1) вначале разбивается вертикальной границей на две равные по числу точек области, в каждой из которых находятся медианные центры, отмеченные на рисунке крестиками. Через них проводится прямая 1, являющаяся линией регрессии y по x .

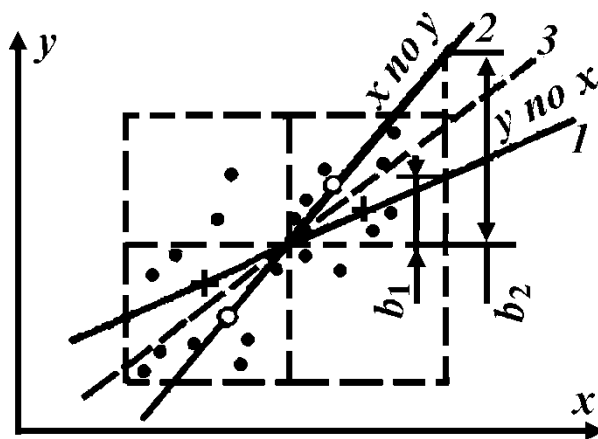


Рис. 1. Быстрая оценка коэффициента корреляции с помощью метода медианных центров

Затем поле точек разбивается горизонтальной границей на две части с равным числом точек, и в каждой из них также находятся медианные центры, помеченные на рисунке незалитыми точками. Через эти центры проводится прямая 2, являющаяся линией регрессии x по y .

Прямые 1 и 2 совпадают между собой и с прямой 3 лишь при коэффициенте корреляции между x и y $\rho_{xy} = 1$, когда все экспериментальные точки лежат строго на прямой 3, т. е. погрешность разброса исходных данных $\gamma = 0$. При $\gamma \neq 0$ и $\rho \neq 1$ прямая 1 идет положе прямой 3 на величину коэффициента корреляции ρ , а прямая 2 – во столько же раз круче. Поэтому если прямая 1 имеет уравнение $y_1 = a_1 + b_1 x$, а прямая 2 – уравнение $y_2 = a_2 + b_2 x$, то всегда $b_2 > b_1$ и $\rho = \sqrt{b_1 / b_2}$, а относительная (приведенная к диапазону изменения y) погрешность исходных данных будет $\gamma = \sqrt{(1 - \rho^2) / 4}$.

Так как для расчета ρ_{xy} нужны не сами значения угловых коэффициентов b_1 и b_2 , а лишь их отношение, то для расчета можно использовать просто

отношение ординат b_1 и b_2 , отмеченных на рис. 1. Вряд ли возможно указать другой, более быстрый способ оценки этих параметров.

Влияние промахов, присутствующих в экспериментальных данных, полностью определяется свойствами оценок центра распределения, положенных в основу используемых экспресс-методов. Оценка центра в виде медианы нечувствительна к промахам. Поэтому при использовании метода медианных центров удаления промахов производить не требуется.

Медианные методы хотя и не являются аналитическими, но легко алгоритмизируются и могут широко использоваться при машинной обработке данных.

В табл. 1 приведены результаты анализа экспериментальных данных с использованием метода медианных центров. Для сравнения в этой же таблице приведены параметры решений, полученных по методу наименьших квадратов. Расчеты проводились на ПЭВМ с помощью пакета анализа, входящего в состав программной среды «Microsoft EXCEL-2000». Из табл. 1 видно, что значения P_0 , полученные по ММЦ и ММК, очень близки. Значения коэффициента A отличаются более заметно. Полученные линейные модели представлены на рис. 2-5.

Таблица 1

Материал	A		P_0		ρ
	ММЦ	ММК	ММЦ	ММК	
Fenstertuch	0,025	0,024	0,260	0,261	0,86
Schwammtuch	0,126	0,132	0,439	0,430	0,85
Microclean	0,123	0,119	0,189	0,192	0,99
Хлопок	0,044	0,054	0,164	0,157	0,72
Полиэстер	0,068	0,086	0,287	0,280	0,92

При экспериментальном определении зависимости y от x погрешности смещения экспериментальной точки вдоль оси x и вдоль оси y не могут быть разделены между собой [1]. Поэтому общепринято условно считать, что определение значений x_i производится без погрешности, а всю случайную погрешность относить к координате y_i , а также считать случайными погрешностями исходных экспериментальных данных разности между координатой y данной экспериментальной точки и координатой $\tilde{y}$, найденной по усредненной модели исследуемого явления (при одном и том же значении независимой переменной x), т. е. $\Delta_i = y_i - \tilde{y}$, где $\tilde{y} = f(x)$. Поэтому значение этих случайных погрешностей Δ_i может быть найдено лишь после того, как будет найдена усредненная модель $\tilde{y} = f(x)$.

Полоса рассеяния экспериментальных точек вокруг найденной усредненной зависимости $\tilde{y} = f(x)$ может иметь самую разнообразную форму. Поэтому наиболее полным описанием формы этой полосы по аналогии с ГОСТ 8.401–80 является описание ее границ формулами в функции значений $\tilde{y}$. Такое аналитическое описание позволяет определить погрешность для каждого

значения y и тем самым является наиболее полной метрологической аттестацией получаемых результатов измерений. Однако определение такой метрологической характеристики метода измерений относительно трудоемко и требует наличия большого объема исходных экспериментальных данных.

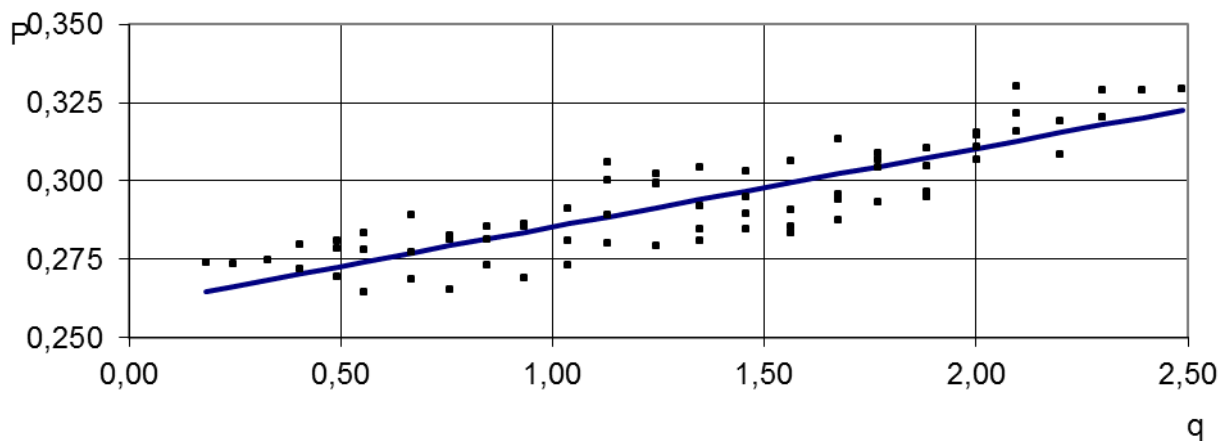


Рис. 2. Зависимость степени поляризации излучения, рассеянного материалом Fenstertuch, от увлажненности

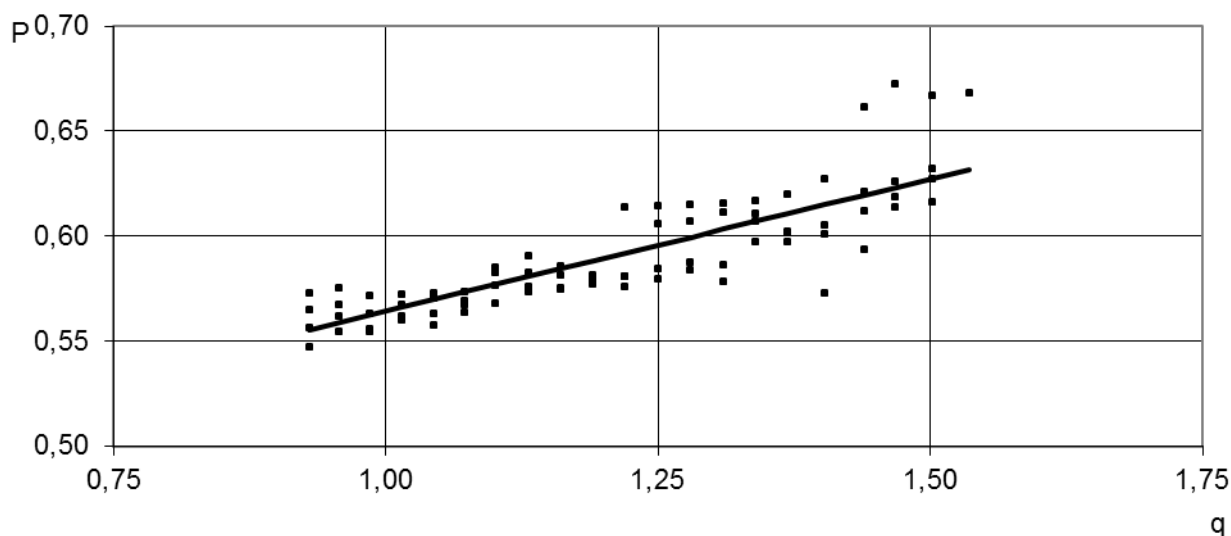


Рис. 3. Зависимость степени поляризации излучения, рассеянного материалом Schwammtuch, от увлажненности

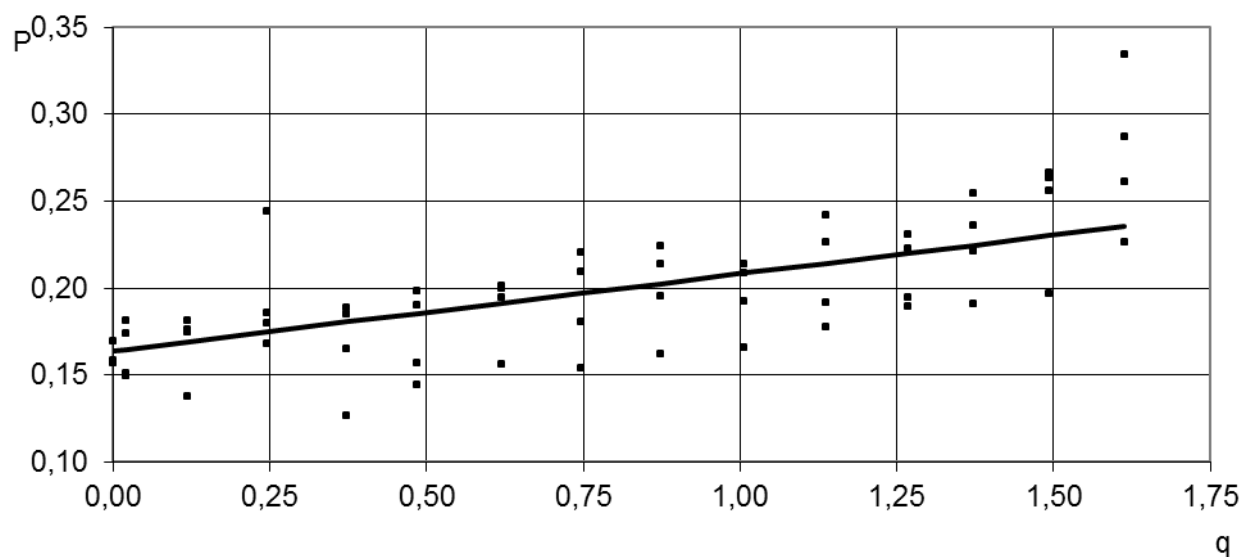


Рис. 4. Зависимость степени поляризации излучения, рассеянного хлопком, от увлажненности

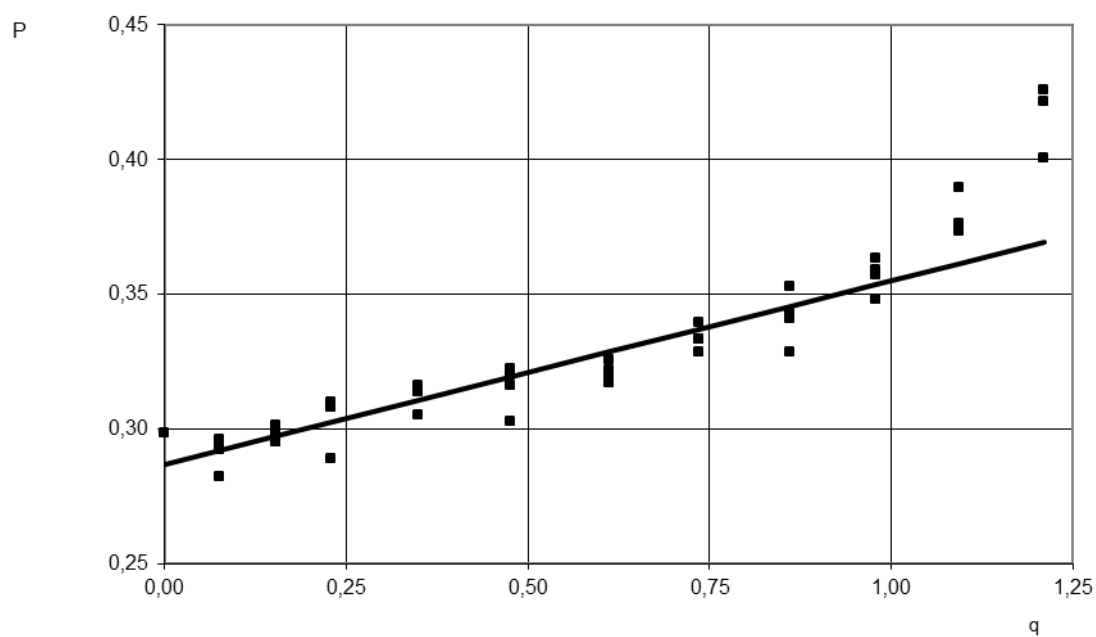


Рис. 5. Зависимость степени поляризации излучения, рассеянного полиэстером, от увлажненности

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новицкий П.В., Зиграф И.А., Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 300 с.

© И.Н. Карманов, Н.А. Мецержаков, 2005.

ПРИМЕНЕНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ПОГЛОЩАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ И ДИСПЕРСИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ЧАСТОТНОЙ СЕЛЕКЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Для осуществления частотной селекции первого типа могут быть использованы сравнительно широкополосные поглощающие фильтры внутри резонатора. Так, например, выходные окна газоразрядной трубки лазера на гелийнеоне изготавливают из специального стекла, поглощающего в ИК области спектра. Тем самым подавляются переходы с $\lambda = 3,39$ и $1,15$ мкм; генерация реализуется лишь на переходе с $\lambda = 0,63$ мкм. Сущность такой селекции поясняет рис. 1; она основана на использовании соответствующим образом подобранной частотной зависимости коэффициента вредных потерь $\eta_1(\omega)$. Генерация происходит на переходе, соответствующем частоте ω_2 , несмотря на то, что этот переход характеризуется более низким коэффициентом усиления по сравнению с переходом на частоте ω_1 .

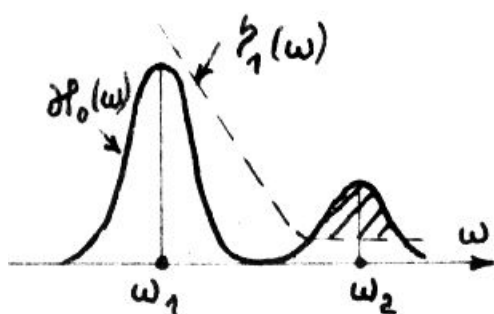


Рис. 1

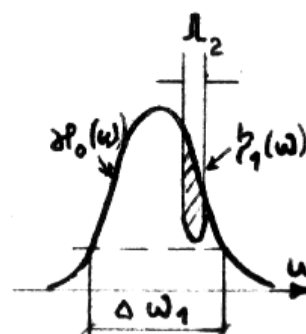


Рис. 2

Для более узкополосной частотной селекции внутри резонатора вносят дисперсные элементы (например, призму), либо заменяют зеркало резонатора дифракционной отражательной решеткой. График частотной зависимости коэффициента потерь $\eta_1(\omega)$ селективного резонатора имеет резкий и узкий "провал" шириной $\Lambda_2 = 10^{12} \div 10^{13} \text{ с}^{-1}$ (рис. 2). Поворачивая призму или отражательную решетку, можно управлять положением этого "провала" на шкале частот и тем самым осуществлять перестройку частоты генерации в пределах ширины линии люминесценции на уровне постоянных потерь (в пределах ширины $\Delta\omega_1$).

Для еще более узкополосной селекции используют в качестве дисперсионного элемента эталон Фабри-Перо (интерферометр Фабри-Перо), представляющий собой систему из близко расположенных параллельных зеркал. Эталон Фабри-Перо позволяет выделить отдельную продольную моду.

Общие замечания о селекции продольных мод

Для селекции продольных мод требуется весьма узкополосный фильтр, позволяющий выделить интервал частот меньше 10^9 с^{-1} . Рис. 3 поясняет возможные пути осуществления такой селекции (штриховой линией показан контур линии люминесценции).

Прежде всего, можно попросту повысить уровень потерь настолько, чтобы разность $\kappa_0 - \eta$ (η - суммарный коэффициент потерь) оказалась положительной лишь для центральной продольной моды (рис. 3а). Разумеется, при этом существенно уменьшается генерируемая мощность. Более выгодно изменить соотношение между максимальными значениями начального коэффициента усиления центральной и остальных продольных мод (в пользу центральной моды) (рис. 3б). Аналогичного результата можно достичь, изменяя контур линии люминесценции, а точнее, уменьшая ширину $\Delta\omega_l$ (рис. 3в). Можно также увеличивать частотный интервал между максимумами продольных мод за счет уменьшения длины резонатора (рис. 3г). Наконец, можно попытаться реализовать достаточно узкополосную селективность коэффициента потерь (рис. 3д).

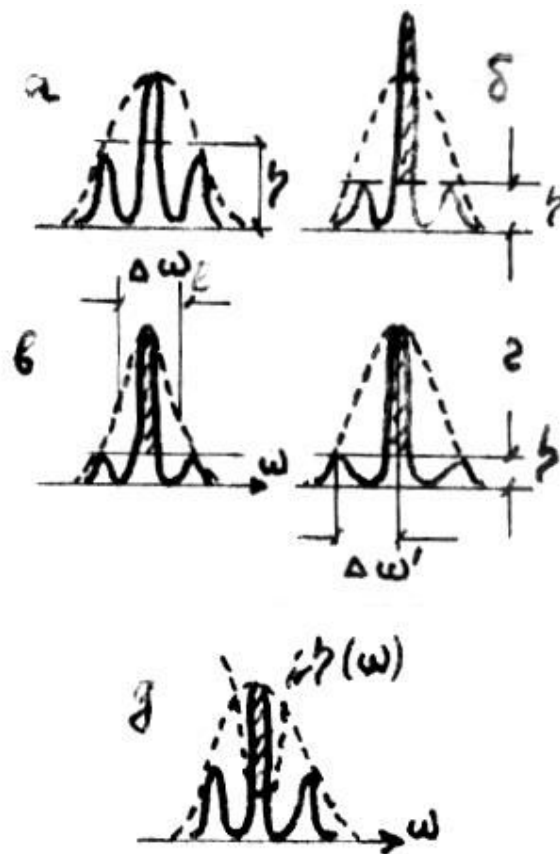


Рис. 3

На практике используют все отмеченные пути селекции мод. Простейшие способы селекции основаны на уменьшении длины резонатора. Более интересны способы селекции, использующие интерференционные, поляризационные и нелинейно-оптические явления.

Интерференционные методы селекции продольных мод

Эти методы основаны на использовании резонаторов с дополнительными зеркалами (связанных резонаторов). Рассмотрим лазер, показанный на рис. 4. Здесь 1 – газоразрядная трубка с окнами под углом Брюстера (активный элемент); 2 – двулучепреломляющий кристалл, расщепляющий световой луч на необыкновенный (линейно поляризован в плоскости рисунка) и обыкновенный (линейно

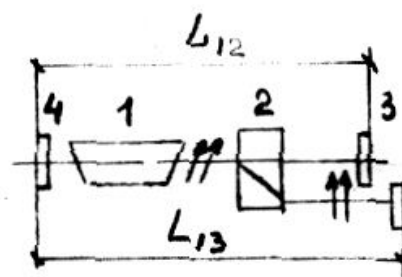


Рис. 4

поляризован перпендикулярно плоскости рисунка); 3 – полностью отражающие зеркала; 4 – выходное зеркало. Фактически здесь два резонатора с различными длинами: L_{12} и L_{13} . Межмодовые расстояния для этих резонаторов равны соответственно

$$\Delta\omega'_{12} = \frac{\pi c}{L_{12}} \quad \text{и} \quad \Delta\omega'_{13} = \frac{\pi c}{L_{13}}.$$

Будем полагать, что выполнено неравенство $\Delta\omega_1 < (\Delta\omega'_{12} - \Delta\omega'_{13})$.

В этом случае спектральные линии резонатора будут иметь вид, показанный на рис. 5. Линии, отмеченные цифрами 1 и 2, оказываются заметно усиленными по сравнению с соседними линиями, поскольку они соответствуют частотам, для которых условие резонанса выполняется одновременно в резонаторах длиной L_{12} и длиной L_{13} . Возникновение таких линий имеет, очевидно, интерференционное происхождение. Расстояние между ними

$$\Delta\omega' = \frac{\pi c}{L_{13} - L_{12}}.$$

При достаточно малой разности ($L_{13} - L_{12}$) можно сделать величину $\Delta\omega'$ большой ($\Delta\omega'$ может превышать ширину линии люминесценции).

Другой вариант интерференционной селекции мод связан с использованием трехзеркального линейного резонатора (рис. 6). Здесь 1 – активный элемент, 2 – полностью отражающее зеркало, 3 – выходное зеркало, 4 – дополнительное зеркало. Рис. 7 иллюстрирует три моды; для сравнения штриховыми линиями даны соответствующие моды в отсутствие дополнительного зеркала. Можно видеть, что интерференционные эффекты приводят к преимущественному усилению центральной моды и к раздвиганию мод.

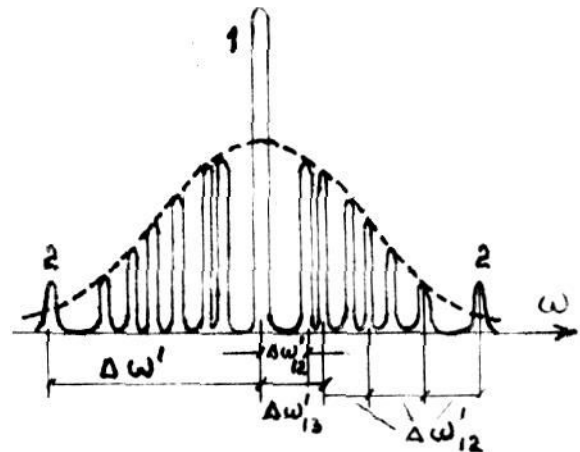


Рис. 5

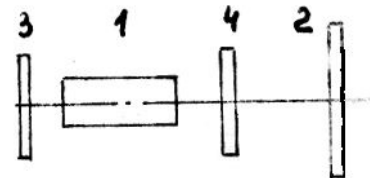


Рис. 6

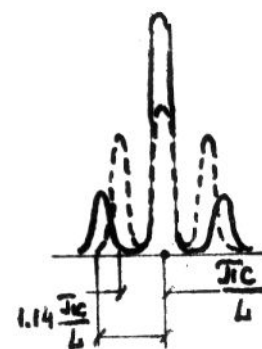


Рис. 7

Резонаторы с анизотропными элементами

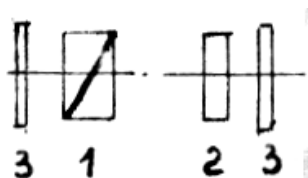


Рис. 8

Для селекции продольных мод могут быть использованы поляризационные свойства резонатора с анизотропными элементами (рис. 8). Здесь 1 – линейный поляризатор; 2 – двулучепреломляющая пластинка, обеспечивающая разность фаз необыкновенного и обыкновенного лучей; равную $\Delta\varphi$; 3 – зеркала резонатора. Оптическая ось пластинки 2

перпендикулярна к оптической оси резонатора и повернута на угол α по отношению к направлению поляризации, фиксируемому поляризатором 1. В этом случае величина $\Delta\varphi$ зависит от частоты излучения, и потери должны периодически меняться с частотой. Это изменение потерь с частотой может быть использовано для селекции продольных мод в рассматриваемом резонаторе. В этом случае потери

$$\Gamma = \sin^2 2\alpha \sin^2 \Delta\varphi$$

при этом

$$\Delta\varphi = \frac{\omega(n_e - n_o)d}{c}$$

где n_e и n_o – показатели преломления для необыкновенного и обыкновенного лучей, d – толщина пластинки.

Нелинейно-оптический метод частотной селекции

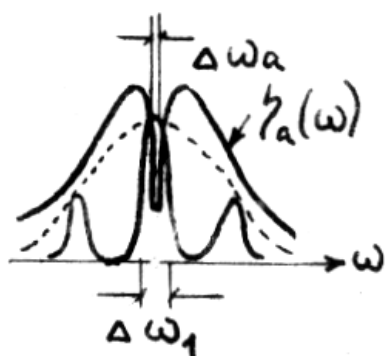


Рис. 9

Предположим, что в резонатор помещен поглощающий элемент, обладающий следующими свойствами: он поглощает на частоте рабочего перехода для данной среды; при наличии достаточно интенсивного излучения на частоте рабочего перехода происходит насыщение поглощения вблизи центра линии поглощения (иначе говоря, имеет место нелинейно-оптический эффект просветления среды). В результате проявления указанного нелинейного эффекта форма линии поглощения (зависимость

коэффициента поглощения от частоты $\eta_a(\omega)$) изменяется: появляется «провал», который может быть достаточно узкополосным. Ширина провала $\Delta\omega_a$ может быть меньше $\Delta\omega_1$ спектральной линии резонатора. В этом случае можно не только выделить одну продольную моду, но еще более сузить ширину генерируемой линии (рис. 9). Данный метод есть не только метод частотной селекции, но также метод стабилизации частоты излучения лазера.

© И.Н. Карманов, Н.А. Мещеряков, 2005.

СПОСОБЫ КОНТРОЛЯ ЧИСТОТЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Задача контроля чистоты поверхностей, относится к тем задачам, которые остаются актуальными во многих областях, начиная от санитарно-гигиенической уборки помещений и заканчивая наноэлектроникой. В частности, в полупроводниковой промышленности и медицине используются точные методы проверки высокой степени чистоты поверхностей [1]. В тоже время для контроля чистоты поверхностей бытовых приборов и устройств, определения степени загрязненности широко используемых материалов разработано гораздо меньше методов и устройств экспресс контроля. На это указывают и предварительные результаты проведенного нами патентного поиска устройств и методов контроля чистоты поверхностей различных материалов. Целью настоящего сообщения является анализ этих результатов. Поиск производился по следующим классам патентов: G 01N 21/17 (системы, в которых на падающий свет влияют свойства исследуемого материала), G 01N 21/21 (системы, в которых свойства материала, влияют на отраженный свет), G 01N 21/88 (системы предназначенные для выявления дефектов и загрязнений). Выбор указанных классов был продиктован нашим интересом к оптическим и оптоэлектронным методам решения задачи контроля чистоты поверхностей. Глубина патентного поиска составляла 50 лет. В результате поиска были выявлены оптические способы и устройства для узко специализированных задач связанных с проверкой чистоты поверхностей различных материалов [2-4].

Эти способы, приборы и устройства могут быть разделены на два типа. Первый тип характеризуется применением контролирующей рабочей жидкости, которая наносится на проверяемую поверхность. В качестве этой жидкости используется дистиллированная вода. В процессе растекания и высыхания пленки жидкости меняется интенсивность, фаза и поляризация отраженной волны из-за изменения коэффициента отражения. Это изменение зависит от степени и типа загрязнения различных поверхностей.

В качестве примера способа первого типа может быть рассмотрен, способ, описанный в патенте [2]. Это изобретение относится к производству изделий, имеющих высокий класс шероховатости поверхности, например магнитных дисков. Сущность способа заключается в следующем: выдерживая магнитный диск над нагретой водой в течение примерно 10 секунд параллельно поверхности воды, конденсацией пара наносят пленку воды на поверхность диска. Помещают диск в камеру с источником света, и с помощью фотозлемента измеряют коэффициент отражения света от контролируемой поверхности. Чистоту поверхности магнитного диска определяют исходя из значения коэффициента отражения света. Авторы изобретения [2] отмечают, что предлагаемый способ дает возможность проследить динамику быстрого загрязнения частицами окружающей среды поверхности тщательно отмытых магнитных дисков. Ими также делается вывод, что предлагаемый способ позволяет дать точную оценку степени чистоты поверхности магнитных дисков

во всем диапазоне возможных загрязнений: от сильно загрязненных магнитных дисков до только что отмытых.

К приборам первого типа можно отнести устройство контроля чистоты поверхностей подложек, описанное в патенте [3]. Это устройство работает следующим образом. Поверхность исследуемой подложки освещается равномерным световым потоком от источника света через конденсор. Часть светового потока отражается от исследуемого участка поверхности подложки и попадает на фотодиод. С помощью дозатора на исследуемый участок поверхности подложки наносится капля жидкости фиксированного объема. Интенсивность отраженного светового потока по мере растекания капли жидкости по исследуемому участку поверхности подложки изменяется. Изменение светового потока регистрируется фотодиодом, на выходе которого формируется импульс тока. Параметры импульса тока определяются динамикой процесса взаимодействия жидкости с поверхностью. Амплитудное значение импульса тока позволяет судить о чистоте поверхности подложки: чем больше значение амплитуды импульса, что соответствует более высокой скорости изменения светового потока и скорости растекания жидкости по поверхности подложки, чем чище поверхность подложки. К недостаткам рассмотренных выше патентов [2,3] следует отнести низкую точность и невысокую скорость измерений.

Второй тип способов и устройств проверки чистоты не требует применения контролирующей рабочей жидкости. К второму типу относятся широко распространенные способы визуальной оценки чистоты поверхностей, в том числе с применением оптических приборов, микроскопов и луп. В качестве примера может быть рассмотрен способ контроля чистоты поверхности оптических деталей зрительной трубы [4], заключающийся в освещении зрительной трубы точечным источником света и анализе изображения источника света через окуляр зрительной трубы. При этом оптическую систему зрительной трубы фокусируют на точечный источник света и совмещают его изображение с центром поля зрения зрительной трубы. Световая волна, освещающая частицы загрязнения поверхностей объектива и окуляра, частично затеняется ими. При расфокусировке зрительной трубы относительно точечного источника света на сетчатке глаза наблюдателя, как на проекционном экране, появляются действительные теневые изображения частиц загрязнения. При увеличении расфокусировки возрастает и масштаб теневого изображения. В поле зрения визирной трубы наблюдатель видит освещенный точечным источником света входной зрачок объектива, затененный частицами загрязнения. Изображение частицы объектива будет иметь большую нерезкость, чем изображение частицы окуляра, по причине большей удаленности частицы от глаза наблюдателя. Перемещением точечного источника в плоскости, перпендикулярной оптической оси зрительной трубы, определяют параллактические смещения теневых изображений частиц загрязнения. Величина же параллактического смещения изображения частиц объектива будет значительно больше параллактического смещения теневого изображения частиц окуляра, что связано с более близким расположением

объектива к осветителю. Это позволяет визуально проконтролировать степень загрязненности объектива и окуляра. По своей сути способ [4] является разновидностью визуальных методов контроля чистоты поверхности с присущей им субъективной оценкой и ограниченностью применения.

В результате проделанного патентного поиска было выявлено, что существующие способы и устройства предназначены для решения только узкоспециализированных задач, связанных с проверкой чистоты поверхностей конкретных материалов или определенных деталей приборов и устройств. Способы же быстрого определения чистоты поверхности различных материалов, кроме субъективного визуального контроля, отсутствуют, да и сами критерии оценки степени чистоты противоречивы. Это является основанием для разработки новых способов и устройств, так как потребность в объективной оценке загрязнения различных поверхностей стала актуальной и для повседневной проверки качества уборки бытовых и производственных помещений. На наш взгляд наиболее практичным с точки зрения приборной реализации является метод, основанный на зависимости степени поляризации рассеянного от исследуемой поверхности линейно поляризованного излучения, с использованием когерентных и некогерентных источников излучения, а также новых оптических голограммных элементов [5]. Но для разработки нового способа контроля чистоты поверхностей следует провести целый ряд экспериментальных исследований по более детальному изучению степени влияния загрязненных поверхностей различных материалов на характеристики отраженного света.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чистые помещения [Текст]/ Под ред. Хаякавы И.// М.: Мир, 1990. – 454с.
2. Пат. 1771532 Советская редакция, Способ контроля чистоты поверхности изделий [Текст]/ Синенко Б.В. и Махров В.Ф., Научно-производственное объединение «Персей», №4635454/25, заявл. 11.01.89; опубл. 23.10.92, Бюл. №39. – 4с.
3. Пат. 1741032 Советская редакция, Устройство контроля чистоты поверхности подложек [Текст]/ Рафельсон Л.Л., Волков А.В., Бородин С.А. и Иванова В.А., Научно-исследовательский институт «Экран», №4865025/25, заявл. 10.09.90; опубл. 15.06.92, Бюл. №22. – 3с.
4. Пат. 1770860 Советская редакция, Способ контроля чистоты поверхности оптических элементов зрительной трубы [Текст]/ Черний А.Н., Московский научно-исследовательский институт туберкулёза, №4863226/25, заявл. 30.08.90; опубл. 23.10.92, Бюл. №39. – 3с.
5. Оптическая голография [Текст]/ Под ред. Колфилда Г. //М.: Мир, 1982.–733с.

© Ю.Ц. Батомункуев, А.С. Дульянинов, Н.А. Мещеряков, 2005

**КАЧЕСТВО УБОРКИ В КЛИРИНГОВЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ И ИХ
МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ**

В настоящее время клиринговые технологии, то есть методы по определению и контролю загрязнения помещений, находят все более широкое применение. Особенно это касается измерения концентрации различных веществ в воздухе или на окружающих предметах [1-4].

Существующие и действующие в настоящее время системы стандартов безопасности труда по воздуху рабочей зоны (ГОСТ 12.1.016–79), общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (ГОСТ 12.1.005–88), требования к чистым помещениям и связанным с ними контролируемым средам (ГОСТ ИСО 14644–1–2000), требования к услугам по уборке зданий и сооружений (ГОСТ Р 51890–2002) и другие стандарты [2-4] являются метрологическим обеспечением отечественных клиринговых технологий.

Целью настоящей работы является анализ метрологического обеспечения клиринговых технологий на примере оценки качества уборки и ухода помещений.

Действующий в настоящее время ГОСТ ИСО 14644–1–2000 устанавливает классификацию чистоты воздуха помещений и связанных с ними контролируемых средах только по одному критерию – по концентрации взвешенных в воздухе частиц (аэрозолей). Взвешенные частицы имеют размеры от 0,1 мкм до 5 мкм. Распределение частиц с меньшими и большими размерами обычно не предсказуемо, так как может резко меняться в каждой точке пространства со временем. Концентрации ультрамелких частиц размером менее 1 мкм задаются (но не классифицируются) при помощи U-дескриптора (U-описания), а макрочастиц размером более 5 мкм – при помощи M-дескриптора (M-описания).

Количественной оценкой чистоты по взвешенным в воздухе частицам является классификационное число N ИСО. Максимально допустимая концентрация частиц C_n для каждого данного размера частиц D определяется по формуле

$$C_n = 10^N \left(\frac{0,1}{D} \right)^{2,08}, \quad (1)$$

где C_n — максимально допустимая концентрация (число частиц в кубометре воздуха) взвешенных в воздухе частиц, равных или больших чем данный размер частиц. Величина концентрации C_n округляется до ближайшего целого числа, при этом используется не более трех значащих цифр;

N — классификационное число ИСО, которое не должно превышать значения 9. Промежуточные числа классификации ИСО могут быть определены с наименьшим допустимым приращением N , равным 0,1;

D — рассматриваемый размер частиц, в мкм;

0,1 — константа, в мкм.

Стандарт ГОСТ ИСО 14644–1–2000 ограничивает классы чистоты пределами от класса 1 ИСО до класса 9 ИСО. Помещения высшей степени чистоты относятся к первому классу, помещения низшей степени чистоты к девятому классу. Обозначение класса чистоты по взвешенным в воздухе частицам для чистых помещений и чистых зон включает:

- а) Классификационное число, выраженное как «класс N ИСО»;
- б) Состояние чистого помещения, для которого применяется классификация;
- в) Рассматриваемый размер частиц и соответствующая концентрация, определенные по формуле (1), где каждый данный пороговый размер частиц находится в пределах 0,1–5,0 мкм.

Для определения концентрации взвешенных в воздухе частиц используется прибор дискретного счета частиц, позволяющий измерить количество частиц в воздухе с возможностью их разделения по размерам [2]. Точки пространства, где производятся измерения, называются точками пробы. Точки проб равномерно распределяются по площади чистого помещения или чистой зоны и устанавливаются на высоте производственной деятельности. В каждой точке отбирается не менее двух литров воздуха за время более одной минуты. Минимальное количество точек проб равно квадратному корню из площади чистого помещения или чистой зоны. По результатам измерения каждой пробы определяют концентрации взвешенных частиц для соответствующей классификации чистоты воздуха.

Таким образом, стандарт ГОСТ ИСО 14644–1–2000 определяет классификационные уровни, которые следует использовать для обозначения чистоты воздуха в производственных помещениях и связанных с ними контролируемых средах, а также стандартный метод контроля и определения концентрации взвешенных частиц. Применение этого стандарта для целей классификации ограничено указанным в нем диапазоном размеров (0,1–5,0 мкм) частиц. Стандарт не определяет классификационные уровни чистоты помещений при наличии в воздухе ультрамелких частиц и макрочастиц, имеющих размеры вне этого диапазона, а лишь устанавливает методы для определения и обозначения их концентраций. Таким образом, рассмотренный стандарт не предназначен для классификации, например, офисных или бытовых помещений.

Стандартом ГОСТ 12.1.005 – 88 регламентировано более 1300 ПДК вредных веществ по воздуху рабочей зоны [3]. По каждому типу вредных веществ разработаны лабораторные методы определения и контроля ПДК. Этот стандарт используется при химической чистке поверхностей, чтобы в процессе работы в воздухе ПДК вредных веществ не превышало нормативных показателей.

Новый стандарт ГОСТ Р 51870-2002 [4] устанавливает общие технические требования к услугам по уборке (внутри и снаружи) зданий и сооружений, прилегающей территории, по уходу за оргтехникoй, компьютерами, мебелью, полами, деталями отделки внутренних и наружных поверхностей зданий, сооружений, а также требования безопасности услуг для жизни и здоровья

потребителей, сохранности их имущества и охраны окружающей среды. Этот стандарт распространяется на организации и индивидуальных предпринимателей, оказывающих услуги по уборке.

Стандарт ГОСТ Р 51870-2002 является основополагающим при разработке нормативных документов на конкретные виды услуг по уходу и уборке. В стандарте приведены 11 наименований конкретных операций по уборке и уходу. В большинстве из них методом контроля качества выполнения операций является внешний осмотр. Критерии оценки носят субъективный характер, так как, например, качество влажной уборки помещений проверяют внешним осмотром убранных поверхностей и оценивают как «чистое», «среднее» и «неприемлемое». Оценка «чистое» означает, что убранная поверхность совершенно чистая от загрязнений. В этом случае каждый квадратный метр получает 2 балла. Оценка «среднее» означает, что общая площадь загрязнения, оставшегося после влажной уборки, составляет не более 4 м² на 100 м² убранной поверхности. В этом случае каждый квадратный метр грязной поверхности получает 1 балл. «Неприемлемое» означает, что общая загрязненная поверхность после влажной уборки более 4 м² на 100 м², при этом каждый квадратный метр грязной поверхности получает 0 баллов. Качество влажной уборки определяют делением количества баллов, полученных в результате оценки, на возможное количество баллов, как если бы каждые убранные 100 квадратных метров поверхности получили по 2 балла. Для признания поверхности приемлемой коэффициент чистоты ее должен быть не менее 0,85.

Предложенная в стандарте ГОСТ Р 51870-2002 трех балльная система оценки качества обладает существенными недостатками: не указано как сравнивать между собой качество уборки двух разных помещений, если каждое из них проверялось разными специалистами, на сколько выставляемые ими оценки соответствуют действительному качеству уборки и ухода помещений, как следует оценивать качество уборки и ухода одного и того же помещения в случае расхождения оценок специалистов. Отмеченные недостатки являются следствием основного недостатка стандарта ГОСТ Р 51870-2002, а именно, отсутствия объективных критериев оценки уборки и ухода помещений, что связано с отсутствием стандартных методов, способов и приборов проверки качества уборки и ухода помещений.

Таким образом, указанные недостатки стандарта ГОСТ Р 51870-2002 ограничивают его применение не только для оценки качества уборки и ухода помещений, но и сдерживают разработку других стандартов и нормативных документов на его основе. На наш взгляд требуется не только существенная доработка и дополнение стандарта ГОСТ Р 51870-2002 методами объективной проверки качества уборки и ухода помещений (что позволило бы устранить все вышеуказанные недостатки), но и нужна разработка единого нового стандарта по клиринговым технологиям. В этот стандарт можно было бы включить нормативные требования, такие как детальная классификация чистоты офисных и бытовых помещений, указание стандартных методов и способов уборки и ухода помещений, более детальная классификация типов загрязнения и другие

нормативные требования, не регламентированные существующими и действующими в настоящее время нормативными документами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ №12.1.005 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны [Текст]. – 1988г. – М.: Изд-во стандартов 1988. – 48с.
2. ГОСТ ИСО №14644-1 Чистые помещения и связанным с ними контролируемые среды [Текст]. – 2000г. – М.: Изд-во стандартов 2000. – 19с.
3. ГОСТ №51890 Услуги по уборке зданий и сооружений [Текст]. – 2002г. – М.: Изд-во стандартов 2002. – 11с.

© Ю.Ц. Батомункуев, А.С. Дульянинов, Н.А. Мещеряков, 2005

УДК 528.

Г.В. Шувалов, К.О. Колесникова

СГГА, Новосибирск

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ В НЕФТЕПРОДУКТАХ

Содержание воды в нефтепродуктах относится к одному из наиболее важных параметров, которые необходимо определять при эксплуатации горюче-смазочных материалов (ГСМ). Вода, содержащаяся в топливе, нарушает нормальную работу двигателя, особенно в зимнее время, так как замерзает и в виде кристаллов льда может забивать фильтры трубопроводов. Дополнительно к этому вода вызывает коррозию металлических частей двигателя. В настоящее время существуют различные методы определения воды в горюче-смазочных материалах. Однако все они обладают рядом недостатков. Это не позволяет использовать данные методы для экспрессного определения содержания воды в топливе, поэтому возникает необходимость в разработке простого и надежного метода экспресс-анализа содержания воды.

В данной работе рассматривается диэлькометрический метод определения содержания воды в нефтепродукте, основанный на удалении (десорбции) воды из испытуемого образца с последующим поглощением удаленной влаги в измерительной ячейке. Измерительная ячейка представляет собой электрический конденсатор, между пластинами которого располагается сорбент. При поглощении влаги сорбентом происходит изменение электрической емкости конденсатора. Величина изменения емкости служит количественной оценкой содержания воды в испытуемом образце. Этот метод является наиболее распространенным для определения твердых тел и жидкостей, при своем возникновении и первоначальном развитии он основывался на измерении емкости датчика-конденсатора, в котором контролируемый материал играл роль диэлектрика, определяющего эту емкость в зависимости от диэлектрической проницаемости.

Математически метод выражается формулой:

$$C=f(\varepsilon)=\frac{1}{k}\varepsilon_0\varepsilon,$$

где С- емкость датчика-конденсатора, Ф;

$K=d/s$ – постоянная электродной системы датчика (для двух параллельных пластин), м/м²;

ε_0 -постоянная равная $8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

ε -диэлектрическая проницаемость контролируемого материала;

d - расстояние между пластинами конденсатора, м;

s - площадь пластин, м².

В действительности, в системах с датчиками емкостного типа измеряется в большинстве случаев полное сопротивление датчиков на переменном токе и реже – отдельные составляющие этого сопротивления. Влажность материалов диэлектрическим методом измеряется обычно при использовании таких физических характеристик материала, как диэлектрическая проницаемость ε и тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$. В некоторых случаях измеряется так называемая добротность Q , численно равная $1/\operatorname{tg}\delta$. Теоретические расчеты, устанавливающие зависимость параметров материала, контролируемых при диэлектрическом методе от его влажности, очень сложны и не всегда в состоянии учесть все свойства материала и условия, сопутствующие измерениям. Поэтому основные характеристики диэлектрического метода получают опытным путем.

Для проведения диэлектрического определения влажности материала требуется установить следующие закономерности:

- Зависимость диэлектрической постоянной и тангенса угла потерь от влажности;

- Поскольку указанные влажностные характеристики зависят от частоты f , возникает необходимость в получении и анализе частотно-влажностных характеристик материала в виде семейства зависимостей графиков $\varepsilon=\varphi(f)$ и $\operatorname{tg}\delta=\varphi'(f)$ при различных влажностях или $\varepsilon=f(w)$ и $\operatorname{tg}\delta=f'(w)$ при различных частотах f .

Существенное влияние на ε и $\operatorname{tg}\delta$ при всех частотах оказывает температура материала. Это приводит к необходимости получения температурно-частотных характеристик для контролируемых материалов при различных значениях влажности. Применительно к жидким средам приходится считаться со степенью дисперсности частиц воды в водомасляных или в водонефтяных эмульсиях. Необходимо иметь в виду и то, что различного рода эмульсии не устойчивы, склонны к расслаиванию и что чем меньше степень дисперсности воды (т.е. крупней ее частицы), тем менее устойчива по времени эмульсия.

Для расчета и конструирования прибора для определения воды была установлена зависимость изменения влагосодержания в образцах дизельного топлива и бензина при продувке образцов высушенным воздухом. Было показано, что «высушивание» образцов осуществляется за время не более 4 минут. Исходя из этого, был выбран период определения влаги в нефтепродуктах – 5 минут. Также экспериментально была установлена зависимость емкости измерительной ячейки от влагосодержания образца. Показано, что при изменении содержания воды 0,01 до 0,1%, изменение емкости составляет от $70 \cdot 10^{-12}$ до $220 \cdot 10^{-12}$ Ф. Чувствительность метода составляет $2,2 \cdot 10^{-9}$ Ф на процент влагосодержания. Погрешность определения

воды составила не более 10%. На основе проведенных предварительных экспериментальных исследований в настоящее время разрабатывается опытный образец прибора для определения содержания воды в горюче-смазочных материалах.

© Г.В. Шувалов, К.О. Колесникова, 2005

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАРБОТАЖНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Плотность нефтепродукта является одним из наиболее важных показателей, характеризующих не только их физико-химические свойства, но и обеспечивающие учет массы нефтепродукта в расчетах при коммерческих операциях. В этой связи к точности определения этого показателя предъявляются достаточно высокие требования. Например, определение плотности бензина и дизельного топлива согласно ГОСТ производится с погрешностью не более 0,06% [1]. В настоящее время для определения плотности нефтепродукта наиболее часто используются стеклянные ареометры для нефти, так называемые нефтенсиметры типа АН-1. Однако, указанные нефтенсиметры имеют целый ряд недостатков, среди которых основными являются влияние на точность измерения субъективных ошибок оператора, при отсчете положения нефтенсиметра по мениску жидкости и чистота поверхности нефтенсиметра [2].

Одним из решений проблемы измерения плотности жидкости является применение барботажного метода. В настоящее время барботажный метод с успехом используется для измерения расхода, плотности и уровня жидкости. Измерительные системы таких приборов, как правило, являются пневматическими, так как в них в качестве информационного параметра используется давление газа в барботажной трубке. Однако, при повышенных требованиях к определению плотности (0,06%), такие же требования предъявляются и к измерению давления в измерительной трубке, что в большинстве случаев представляет собой трудную метрологическую задачу. Однако, изучение явления барботажа показывает, что измерительные возможности барботажных систем не исчерпаны и могут быть положены в основу разработки новых методов измерения плотности. В данной работе рассматривался барботажный метод определения плотности, в основу которого положено измерение количества пузырьков, выходящих из измерительной трубки. При этом измерение аналогового сигнала (изменение давления) превращается в измерение дискретных параметров (количество пузырьков), что позволяет повысить точность измерения.

Принцип действия анализатора основан на измерении гидростатического давления жидкости в определенном объеме. Давление в жидкости на некоторой глубине от поверхности равно весу столба этой жидкости и определяется формулой:

$$P = \rho \cdot g \cdot H,$$

где P – давление в жидкости;

ρ – плотность жидкости;

g – ускорение свободного падения;

H – высота столба жидкости.

Если величина H постоянная, то давление зависит только от плотности жидкости. Следовательно, давление, измеренное датчиком давления, может служить мерой плотности жидкости.

Давление столба жидкости измеряется при продувании инертного газа (воздуха) через трубку, помещенную в контролируемую жидкость. Для того, чтобы исключить влияние колебания уровня жидкости на показания плотномера, применяют дополнительную трубку, опущенную в сосуд, причем разница высот трубок в жидкости составляет 30-40 мм. В этом случае показания манометра не зависят от уровня жидкости в сосуде и будут определяться расстоянием между концами трубок и плотностью жидкости, т.е.

$$\Delta P = g \cdot \rho \cdot \Delta h$$

В данном анализаторе информация о гидростатическом давлении снимается не в виде показания манометра, а в виде количества пузырьков воздуха, выходящих из измерительных трубок.

Расход воздуха через трубку V_0 будет определяться формулой:

$$V_0 = K_1 \cdot P_0,$$

где K_1 – коэффициент пропорциональности, зависящий от конструктивных параметров трубки;

P_0 – давление в трубке.

Пузырьки выходят из трубки определенного объема V_n . Этот объем зависит от внутреннего диаметра трубки. Общее количество пузырьков, выходящих из трубки, будет определяться формулой:

$$N = V_0 / V_n = K_2 \cdot P_0,$$

где $K_2 = K_1 / V_n$, т.е. будет пропорционально давлению в измерительной трубке.

Для измерения количества пузырьков, выходящих из трубок, используется фотоэлектронный счетчик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 3900 – 85 (СТ СЭВ 6754 – 89) «Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности». Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам. Москва, 1991.
2. Кивилис С.С. Плотномеры. Москва. «Энергия», 1980.

© Г.В. Шувалов, Е. В. Милехина, 2005

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ ПРИБОР ДЛЯ ЭТАЛОНИРОВАНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ УРОВНЕЙ, НИВЕЛИРОВ И КРЕНОМЕТРОВ

Перед началом эксплуатации все геодезические приборы подлежат обязательной аттестации, в результате которой устанавливается соответствие последних определенным показателям. В качестве эталонов широкое применение нашли устройства интерференционного типа, являющиеся к настоящему времени наиболее точными и эффективными.

В данной статье приводится описание прибора интерференционного типа, который может найти широкое практическое применение при эталонировании высокоточных уровней, нивелиров и кренометров. Схема прибора показана на рисунке. Приведём краткое описание устройства и принципа его действия.

Эталон выполнен на основе известной схемы интерферометра Хайдингера [1]. Сущность его работы состоит в том, что величина крена определяется по смещению интерференционной картины. Величина крена прямо пропорциональна смещению интерференционной картины, которое регистрируется специальным фотоэлектронным устройством. Точность эталона зависит от геометрических параметров прибора и его физических постоянных. В качестве источника света можно использовать инжекционный лазер типа ИЛПИ – 2, а в качестве жидкости – ртуть, либо другую жидкость с хорошей отражательной способностью.

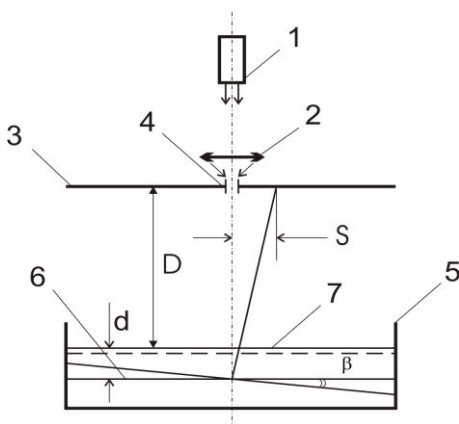


Рис. Схема интерференционного прибора

Прибор содержит монохроматический источник света 1, положительную линзу 2 малого увеличения, белый экран 3 с центральным отверстием 4. Нижняя часть прибора включает в себя сосуд 5, частично заполненный ртутью 6, и полупрозрачную пластину 7, расположенную над поверхностью жидкости параллельно плоскости основания. Источник света установлен неподвижно над центральной частью сосуда таким образом, чтобы лазерный пучок падал нормально к уровневой поверхности, которая в случае отсутствия крена параллельна плоскости основания. Источник света, линза и точечное отверстие экрана размещаются на одной линии, перпендикулярной плоскости экрана.

Взаимное расположение источника света, линзы и экрана в процессе работы должно оставаться неизменным, а плоскость экрана при этом должна быть параллельна плоскости основания сосуда.

Источник света, линза и экран конструктивно могут быть объединены в единый блок, в котором их взаимное расположение должно оставаться неизменным. Этот блок должен быть скреплён с корпусом сосуда таким образом, чтобы лазерный пучок от источника падал нормально на экран и пластину. Блок может быть выполнен и съёмным. Для этого необходимо предусмотреть наличие цапф, на которые в процессе измерений должен устанавливаться съёмный блок. Сферическая световая волна создается фокусировкой лазерного пучка с помощью короткофокусной линзы.

Принцип работы устройства заключается в следующем. Устройство согласовывается с прибором, подлежащему аттестации. Эталон приводится в исходное положение, при котором достигается параллельность поверхности жидкости и полупрозрачной пластины. Далее производится собственно эталонирование. Угол крена определяется по смещению интерференционной картины, который выражается формулой

$$\beta = 0,5 dS / (nD)^2, \quad (1)$$

где d – толщина слоя жидкости;

S – величина смещения интерференционной картины;

D – расстояние между пластиной и жидкостью;

n – показатель преломления среды между пластиной и рабочей поверхностью.

Величина $K = 0,5d / (nD)^2$ представляет собой конструктивную постоянную прибора и выражение (1) с учетом этого можно переписать в виде

$$\beta = kS. \quad (2)$$

Согласно последнему выражению угол крена является величиной прямо пропорционально зависящей от величины смещения интерференционной картины. Принимая конструктивные величины d , D и n за величины постоянные и безошибочные, функциональная погрешность прибора определится выражением

$$m_{\beta}'' = k m_S \rho''. \quad (3)$$

При этих условиях можно отметить, что средняя квадратическая погрешность определения крена зависит лишь от погрешности измерения величины смещения интерференционной картины. Примем величину этой погрешности равной 0,01 мм. Такую точность определения величины смещения интерференционной картины можно достигнуть, например, с помощью фоторегистрирующего устройства, выполненного на базе ПЗС-линейки.

Пусть показатель n среды между пластиной и рабочей поверхностью равен 1,05, а конструктивные параметры соответственно будут $d = 2$ мм, $D = 400$ мм. Тогда с учетом этого коэффициент k будет равен $1,764 \times 10^{-5} \text{ мм}^{-1}$. При габаритах прибора, позволяющих измерять величину смещения интерференционной картины в пределах 100 мм, диапазон составит $60''$.

Установим конструктивную погрешность прибора. Для этого зададимся следующими погрешностями постоянных параметров при тех же их значениях,

т.е. $m_d = 0,01$ мм, $m_D = 0,5$ мм и $m_n = 5 \times 10^{-5}$. При таких данных конструктивная постоянная будет равна $3,034 \times 10^{-6}$ мм⁻¹ и погрешность за конструктивные неточности составит величину 7×10^{-9} мм⁻¹, которая является пренебрегаемо малой величиной, т.е. при таких конструктивных погрешностях точность прибора не искажается.

При $m_d = 0,1$ мм, $m_D = 1$ мм и $m_n = 5 \times 10^{-5}$ погрешность коэффициента составит величину $3,61 \times 10^{-6}$ мм⁻¹ и конструктивная погрешность прибора примет удвоенное значение функциональной погрешности. Так, при $m_s = 0,01$ мм, $m_\beta = 0,013''$.

Приведем также результаты исследования влияния внешних переменных на точность эталона, т.е. определим фактическую погрешность определения крена с учётом реальных условий. Основным фактором, от которого зависит фактическая точность, является градиент температуры. Исследование влияния температуры на точность прибора показали, что при градиенте $2-3^\circ$ эти влияния являются пренебрегаемо малыми и в каждом конкретном случае должны предусчитываться отдельно с учётом требуемой точности эталонирования, конструктивных особенностей и реальных условий. Для повышения точности прибора можно рекомендовать его термостатирование или же дополнительно измерять температуру и вводить соответствующие поправки.

В заключение можно резюмировать, что интерференционный прибор, обладающий чувствительностью соизмеримой с полудлиной волны излучения, может найти широкое применение при эталонировании высокоточных уровней, нивелиров и кренометров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оптический производственный контроль / Под ред. Д. Малакары; Пер. с англ. Е.В. Мазуровой и др.; Под ред. А.Н. Соснова. – М.: Машиностроение. – 1985. – 400 с.

© В.М. Украинко, 2005

О РЕЗУЛЬТАТАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

В статье приведены результаты прогнозов отклонений Всемирного времени UT1 от координированного UTC, полученные при моделировании неравномерностей вращения Земли на 100 летнем интервале. Показаны основные идеи, использованные при разработке алгоритмов прогнозирования.

Изучение особенностей суточного вращения Земли всегда было актуальным для многих наук о Земле. В геофизике путем построения соответствующих математических моделей удается отсеивать ложные гипотезы и модели внутреннего строения Земли. В космической геодезии задача определения и прогнозирования параметров вращения Земли приобрела особую актуальность. Это связано с появлением в США и России глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. Предвычисленные значения ПВЗ входят в начальные условия при решении дифференциальных уравнений движения космических аппаратов. В итоге точность координатно-временных определений выполняемых с помощью ГЛОНАСС и GPS изначально зависит от ошибок принятой модели вращения Земли, заложенной в программном обеспечении КА. Отсюда вытекают современные требования к точности прогнозирования ПВЗ для целей эфемеридно-временного обеспечения КНС ГЛОНАСС.

В соответствии с планом модернизации КНС ГЛОНАСС срок автономного функционирования КА ГЛОНАСС-К должен составлять 60 суток, в том числе без снижения точностных характеристик – не менее 10–15 суток, в течение которых предполагается закладка на борт обновленных ПВЗ. Таким образом, при разработке модели прогнозирования ПВЗ необходимо обеспечить максимально возможную точность на интервал 10–15 суток.

Согласно данным, приведенным в Интерфейсном контрольном документе системы ГЛОНАСС, погрешности (СКП) эфемерид, передаваемых с борта КА ГЛОНАСС-М не должны превышать 7 м по касательной и бинормали к орбите. При радиусе орбиты $R=25,5$ тыс. км это соответствует угловой погрешности $0",057$. Отсюда возникают требования к точности прогнозирования ПВЗ, вклад которых в общую погрешность определения координат КА допускается до 50%. При этих условиях допустимая СКП при прогнозировании на 15 дней для координат полюса составит $0,01–0,02"$, а всемирного времени – 1,5 мс.

Создание методик прогнозирования ПВЗ, удовлетворяющим перечисленным требованиям задача крайне сложная, особенно для прогнозирования всемирного времени, что связано с нерегулярными и непредсказуемыми возмущениями скорости вращения Земли.

В настоящее время, ведущее место в мире по качеству прогнозов принадлежит Международной службе вращения Земли (МСВЗ). Так заявленная в МСВЗ точность прогнозирования ПВЗ на 15 суток составляет:

- По координатам полюса: $0,005 – 0,008"$;

– По поправкам $dUT1$: 1,5 – 2,5 мс.

Методика прогнозирования, применяемая в МСВЗ, основана на последовательном уравнивании ряда данных $dUT1$ за океанские приливы, сезонные колебания и тренд. При этом, приливы рассчитываются на основе физической теории движения Луны и Солнца, а сезонные колебания и тренд оцениваются по данным астрооптических, спутниковых и других наблюдений [1]. Остаточные статистические свойства прогнозируемого временного ряда учитываются с помощью стандартной методики авторегрессии.

В России прогнозированием ПВЗ занята служба ПВЗ ГСВЧ, использующая значительно меньший объем измерительных данных по сравнению с МСВЗ, что несколько ухудшает качество прогнозов. В результате они оказываются неудовлетворительными для целей ЭВО ГЛОНАСС.

Из ПВЗ параметр $dUT1$ относится к наиболее трудно прогнозируемому. Считается, что на точность предвычислений $UT1$ основное влияние оказывают нерегулярные изменения скорости вращения Земли, происходящие на интервалах в 1–2 года. Их аппроксимация линейными трендами приводит к значительным ошибкам из-за неопределенности выбранных линейных коэффициентов.

На рис. 1 приведен график восстановленных разностей $dUT1 = UT1 - UTC$, начиная с 1656 г.

Анализируя приведенный график, следует отметить, что для построения полноценной гармонической модели вращения Земли необходимо иметь данные на значительно большем интервале времени, на котором можно обнаружить повторяемость процесса изменений $dUT1$. Кроме этого, задача моделирования усложняется тем, что для выделения действительных гармонических составляющих во вращении Земли в настоящее время не подходит ни один из известных математических методов.



Рис. 1. Восстановленные разности UT1–UTC

Непосредственное оценивание параметров математических моделей из условий минимума принятых функционалов, определяющих близость математической модели к эмпирическим данным, проблематично из-за нелинейного характера зависимости величины DUT1 от параметров гармонических компонент.

Предлагаемая методика позволяет облегчить решение поставленной задачи за счет преобразования исходных данных. Принцип этого преобразования состоит в том, что на ограниченном интервале области известных значений DUT1 подбираются смещенные на половину друг от друга отрезки временных рядов некоторой длины, а затем производится последовательное суммирование значений функции DUT1 на этих отрезках. При этом, если длина отрезка оказывается близкой к полупериоду искомой гармонической составляющей, то происходит сложение значений функции на всех нечетных отрезках со знаком «+», а на четных со знаком «-». В результате на рассматриваемом отрезке будет получена гармоническая составляющая вращения Земли с амплитудой в n раз больше ее истинного значения, в то время как уровень аperiodических составляющих, носящих случайный характер, а также амплитуд гармоник с другим периодом, увеличатся в среднем в $\sqrt{n}$ раз. Кроме этого, исключается тренд за счет сложения линейных компонент с разными знаками.

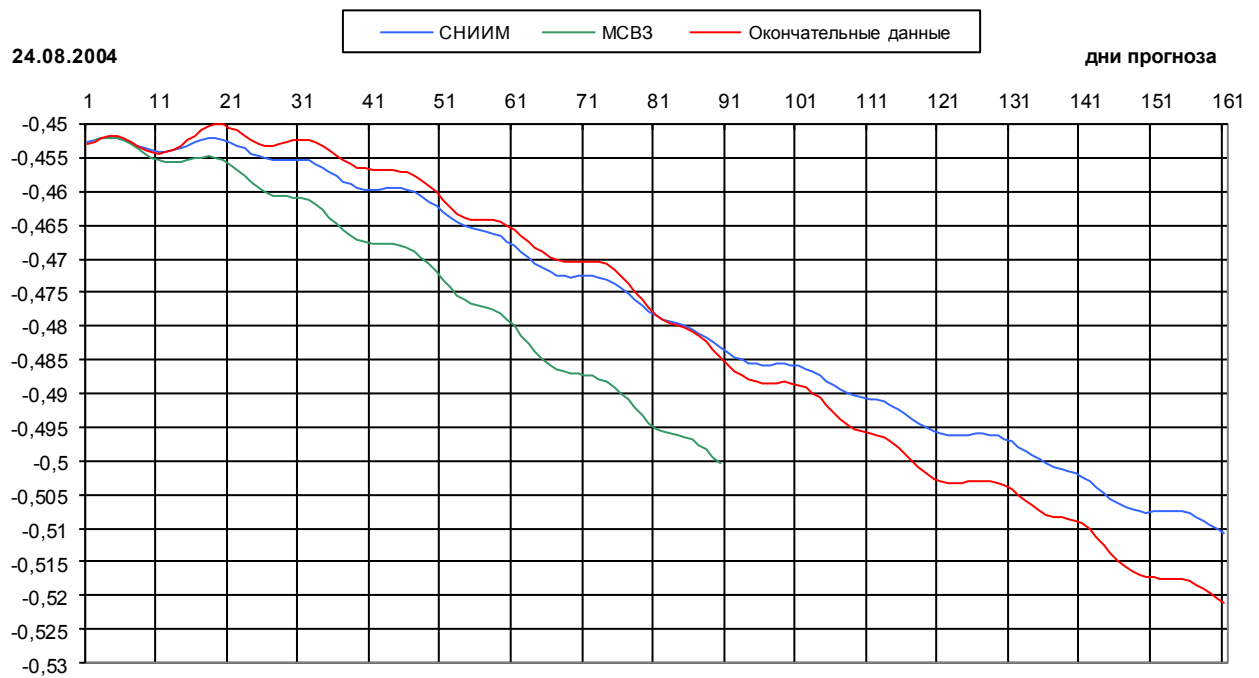


Рис. 2. График прогнозов IERS и СНИИМ от 24.08.2004 г.

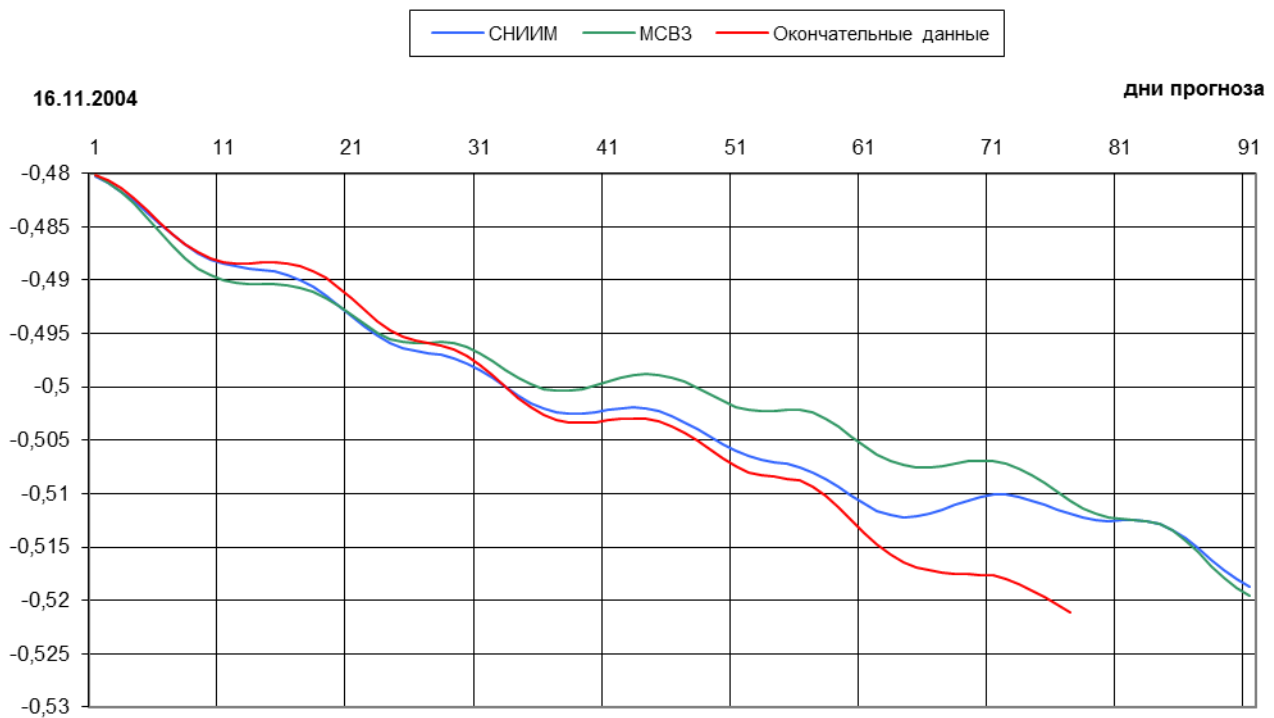


Рис. 3. График прогнозов IERS и СНИИМ от 16.11.2004 г.

Данная методика показала существенно лучшую точность прогнозирования величины $dUT1$ сроком до двух месяцев по сравнению с результатами МСВЗ. Так, например, среднее значение абсолютной разности по 10 прогнозам составило около 0,5 мс на 10 дней; 0,9 мс на 20 дней и 2,6 мс на 60 дней. Эти характеристики прогнозов в 2-4 раза превосходят аналогичные, заявляемые в МСВЗ.

Для демонстрации полученных результатов на рис. 2 и 3 приведены графики прогнозов IERS и СНИИМ от 24.08.2004 г. (модифицированная юлианская MJD=53242) и 16.11.2004 г. (MJD=53325), выполненных для НПО ПМ г. Красноярска.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Dennis D. McCarthy*. IERS Technical note 21 // IERS Conventions 1996., Central Bureau of IERS – Observatoire de Paris. 1996.P.22-77.

© *А.Ю. Балахненко, В.М. Тиссен, А.С. Толстиков, 2005*

СУММИРОВАНИЕ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ И СЛУЧАЙНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ, РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПО НОРМАЛЬНОМУ ЗАКОНУ

Рассмотрим случайную Δ_x^0 и систематическую Δ_{sx} составляющие погрешности измерений величины X как независимые, распределенные по нормальному закону:

$$f_1(\Delta_x^0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(\Delta_x^0)} e^{-\frac{(\Delta_x^0)^2}{2D(\Delta_x^0)}},$$

$$f_2(\Delta_{sx}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(\Delta_{sx})} e^{-\frac{\Delta_{sx}^2}{2D(\Delta_{sx})}},$$

где $D(\Delta_x^0)$, $D(\Delta_{sx})$ - дисперсия величин Δ_x^0 и Δ_{sx} ;

$\sigma(\Delta_x^0)$, $\sigma(\Delta_{sx})$ - СКО величин Δ_x^0 и Δ_{sx} , соответственно.

Найдем закон распределения суммарной погрешности $\Delta_\Sigma = \Delta_x^0 + \Delta_{sx}$, то есть композицию нормальных законов распределения величин Δ_x^0 и Δ_{sx} . Как известно, плотность распределения композиции (свертки) двух законов распределения [1]:

$$f(\Delta_\Sigma) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\Delta_x^0) f_2(\Delta_\Sigma - \Delta_x^0) d\Delta_x^0.$$

В нашем случае

$$f(\Delta_\Sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(\Delta_x^0)\sigma(\Delta_{sx})} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\left(\frac{(\Delta_x^0)^2}{2D(\Delta_x^0)} + \frac{(\Delta_\Sigma - \Delta_x^0)^2}{2D(\Delta_{sx})}\right)} d\Delta_x^0.$$

Если в показателе степени подынтегральной функции раскрыть скобки и привести подобные члены, нетрудно получить

$$f(\Delta_\Sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(\Delta_x^0)\sigma(\Delta_{sx})} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-A(\Delta_x^0)^2 + 2B\Delta_x^0 - C} d\Delta_x^0, \quad (1)$$

$$\text{где } A = \frac{1}{2} \frac{D(\Delta_x^0) + D(\Delta_{sx})}{D(\Delta_x^0)D(\Delta_{sx})};$$

$$B = \frac{\Delta_\Sigma}{2D(\Delta_{sx})};$$

$$C = \frac{\Delta_\Sigma^2}{2D(\Delta_{sx})}.$$

Интеграл в (1) – табличный:

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-Ax^2 + 2Bx - C} dx = \sqrt{\pi / A} e^{-\frac{AC + B^2}{A}}.$$

Подставив полученное в (1) и проведя несложные преобразования, найдем

$$f(\Delta_{\Sigma}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{\sigma^2(\Delta_x^0) + \sigma^2(\Delta_{sx})}} e^{-\frac{\Delta_{\Sigma}^2}{2(\sigma^2(\Delta_x^0) + \sigma^2(\Delta_{sx}))}}. \quad (2)$$

Нетрудно видеть, что суммарный закон распределения систематической и случайной составляющих погрешностей, каждая из которых распределена по нормальному закону, при их независимости будет представляться также нормальным законом с параметрами:

$$\begin{aligned} m(\Delta_{\Sigma}) &= m(\Delta_x^0) + m(\Delta_{sx}) = 0, \\ \Delta_{\Sigma} &= \Delta_x^0 + \Delta_{sx}, \\ \sigma(\Delta_{\Sigma}) &= \sqrt{\sigma^2(\Delta_x^0) + \sigma^2(\Delta_{sx})}. \end{aligned}$$

Ясно, что если имеется n независимых случайных или систематических погрешностей измерений, каждая из которых распределена нормально, то величина

$$\Delta_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Delta_i$$

также распределена по нормальному закону, причем

$$\sigma(\Delta_{\Sigma}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma^2(\Delta_i)}. \quad (3)$$

Если случайные (систематические, рассматриваемые как случайные) погрешности измерений нельзя считать независимыми между собой, то при нормальном законе распределения каждой из суммируемых погрешностей следует руководствоваться правилом: при суммировании n зависимых случайных Δ_i^0 погрешностей измерений закон распределения суммы остается нормальным с суммарным средним квадратическим отклонением погрешности, равным

$$\sigma(\Delta_{\Sigma}^0) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma^2(\Delta_i^0) + 2 \sum_{i < j} r(\Delta_i^0, \Delta_j^0) \sigma(\Delta_i^0) \sigma(\Delta_j^0)}, \quad (4)$$

где $r(\Delta_i^0, \Delta_j^0) = \frac{K_{\Delta_i^0 \Delta_j^0}}{\sigma(\Delta_i^0) \sigma(\Delta_j^0)}$ - коэффициент корреляции между значениями погрешностей Δ_i^0 и Δ_j^0 .

Если коэффициент корреляции между величинами Δ_i^0 и Δ_j^0 в пределах n измерений не меняется (для практических целей), формула (4) упрощается

$$\sigma(\Delta_{\Sigma}^0) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma^2(\Delta_i^0) + 2r \sum_{i < j} \sigma(\Delta_i^0) \sigma(\Delta_j^0)}. \quad (5)$$

Если суммируются погрешности двух серий измерений (или случайная и систематическая составляющие погрешности одной серии измерений и т. п.), определены значения $\sigma(\Delta_1^0)$ и $\sigma(\Delta_2^0)$, то СКО суммарной погрешности измерений

$$\sigma(\Delta_{\Sigma}^0) = \sqrt{\sigma^2(\Delta_1^0) + \sigma^2(\Delta_2^0) + 2r\sigma(\Delta_1^0)\sigma(\Delta_2^0)}.$$

При этом возможны три предельных случая:

$$\text{при } r=0, \quad \sigma(\Delta_{\Sigma}^0) = \sqrt{\sigma^2(\Delta_1^0) + \sigma^2(\Delta_2^0)},$$

$$\text{при } r=1, \quad \sigma(\Delta_{\Sigma}^0) = \sigma(\Delta_1^0) + \sigma(\Delta_2^0),$$

$$\text{при } r=-1, \quad \sigma(\Delta_{\Sigma}^0) = |\sigma(\Delta_1^0) - \sigma(\Delta_2^0)|.$$

Суммирование абсолютных погрешностей измерений, когда их число превышает 3, производится по формулам, аналогичным (3) и (4) с тем, чтобы избежать неоправданного увеличения суммарной абсолютной погрешности измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. - Л.: Энергия, 1978. - 262 с.

© И.Н. Карманов, Н.А. Мещеряков, 2005

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО КОМПАРАТОРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОВЕРКИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СИ

При поверке штриховых мер длины на компараторах используют два метода измерений: метод сравнения измеряемой меры с эталоном-мерой и метод абсолютный интерференционный - в длинах волн эталонного источника излучения. Наиболее перспективен для использования второй метод, так как в качестве источников излучения в настоящее время повсеместно применяются стабилизированные лазеры. Учитывая, что в 1983 г. на Генеральной конференции по мерам и весам решён вопрос о новом определении метра, при воспроизведении которого будет применено стабилизированное излучение лазеров определённых длин волн, указанный метод отвечает международным требованиям при передаче значений единицы длины.

Компараторы для измерений штриховых мер длины абсолютным интерференционным методом строятся по двум типичным схемам.

В схеме типа 1 измеряемая мера установлена на перемещающейся каретке, к которой закреплён отражатель лазерного измерителя перемещений, а фотоэлектрический микроскоп для регистрации положения штриха меры и лазерный измеритель перемещений закреплены неподвижно на станине компаратора.

Интерференционный компаратор СГГА проектируется по схеме типа 2 (рис. 1), где измеряемая мера 1 неподвижна. Расстояние между штрихами регистрируется подвижным микроскопом 2, который несёт на себе отражатель 3 лазерного измерителя перемещений 4, закреплённого на неподвижной станине 5.

Рассмотренные методы измерений показывают, что измерения абсолютным интерференционным способом с перемещаемой штриховой мерой длины возможны и рациональны для измерений расстояний 1÷3 м. При измерении расстояний более 3 м возникают сложности с изготовлением соответственно кареток перемещаемого стола и направляющих для перемещения. Измерения абсолютным интерференционным способом по схеме Вайселя [1] пригодны лишь для дискретных величин, зависящих от применяемого в схеме эталона штрихоконцевой меры в виде геодезического жезла, изготовленного из оптического кварцевого стекла. Настройка такого измерительного устройства весьма сложна и практически не применяется.

Наиболее выгодным представляется метод измерения с неподвижной штриховой мерой и подвижным измерительным микроскопом и дополнительными центрирующими и контактными устройствами при измерении штриховых мер и калибровке приборов для измерений больших длин типа оптических дальномеров. Исследование и методика измерений на таких компараторах рассмотрена авторами в отчёте о научной работе по созданию компаратора и в данном докладе подробно не рассматривается.

Исследования проводились с использованием эталонов штриховых мер 2-го разряда и эталонных измерителей перемещений лазерных (ИПЛ) двух типов: LA-3002 производства Чехословакии и HP5529A фирмы Agilent США. При аттестации ИПЛ, которая проводилась на эталонах Сибирского научно-исследовательского института метрологии (СНИИМ), средняя квадратическая погрешность измерений (СКП) на длине 1 м не превышала 1 мкм. Сравнения результатов аттестации эталонов ИПЛ на компараторе Института ядерной физики (ИЯФ) СО РАН на длине 24 м не превышали 3 мкм, а предельно допустимая погрешность измерений при вероятности 0,95 оценивалась и не превышала $8\div 9$ мкм.

В ходе исследований выяснились основные источники погрешности измерений, которые существенно зависят от конструкции и способа регистрации отсчётным микроскопом положения штриха меры, особенно при контактном способе регистрации, а также от изменения положения отсчётного микроскопа за счёт непрямолинейности направляющих и изменения температуры в процессе измерения.

Анализ результатов измерений рабочих эталонов длины 2-го разряда инварных проволок и лент в количестве 10 штук и результаты аттестации ИПЛ в течение 10 лет (5 протоколов) показали, что значение длины штриховых эталонов значительно изменяется, в то же время, эталоны ИПЛ изменились незначительно. Это свидетельствует о необходимости совершенствования схемы и устройства для измерения штриховых мер длины. При разработке проекта компаратора СГГА особое внимание было уделено:

- Совершенствованию метода регистрации положения штриха меры (бесконтактный фотоэлектрический метод);
- Коррекции результатов измерений от непрямолинейности перемещения регистрирующего устройства и учёта поправок на рефракцию по трассе измерения.

На рис. 1 представлена принципиальная схема компаратора.

Как отмечалось ранее, непрямолинейность направляющих в такой измерительной системе вызывает наклон регистрирующего устройства (микроскопа), что вносит погрешность регистрации положения штриха, величина которой пропорционально связана с несоблюдением принципа Аббе при измерении. Учитывая, что технологически невозможно создать высокоточные направляющие, тем более неизменные во времени, на современном этапе развития науки и техники возможен контроль изменения положения элементов конструкции и ввода соответствующих поправок. Для корректировки результатов измерений штриховых мер длины от несоблюдения принципа Аббе [2] в измерительное плечо интерферометра введён дополнительный блок измерения углового положения регистрирующего устройства, измерительная информация с которого используется для введения поправки в результаты измерения длины меры.

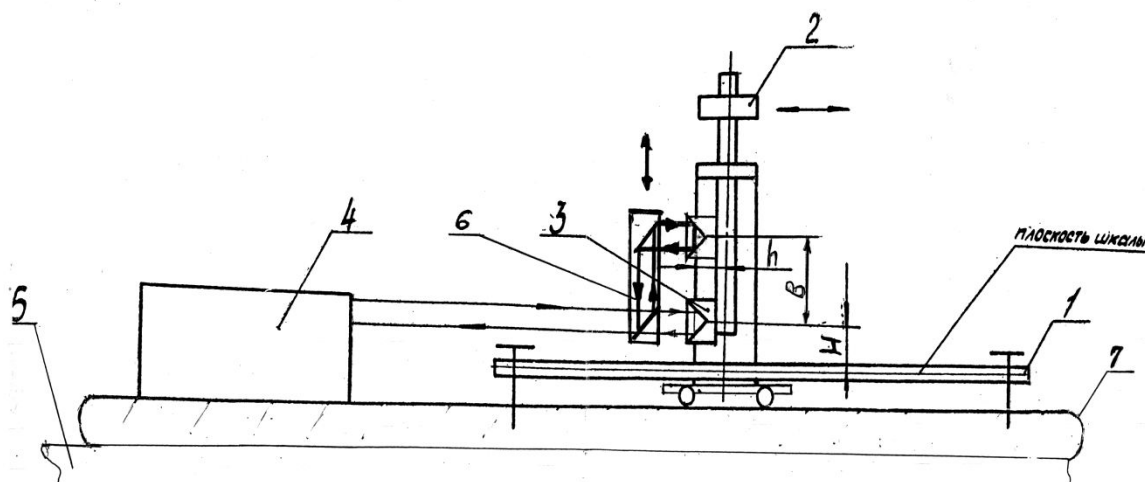


Рис. 1. Схема компаратора (тип 2) с неподвижной мерой:

1 – неподвижная измеряемая мера; 2 – подвижный микроскоп; 3 – отражатель ИППЛ; 4 – ИППЛ; 5 – неподвижное основание; 6 – угольный блок; 7 – направляющие

Для корректировки результатов измерений длины за счёт рефракции воздуха на трассе измерений используется специальный рефрактометр для абсолютного измерения показателя преломления воздуха и введения поправок в вычислительный блок. Общий вид компаратора представлен на рис. 2.

При разработке технического проекта компаратора исходили из следующего:

- Стабильность конструкции при рациональной технологичности изготовления;
- Максимальный учёт возможных составляющих погрешностей измерений и возможность их регистрации или компенсации;
- Автоматизацию измерений и обработки результатов измерений.

Для размещения компаратора используется специальное одноэтажное помещение (галерея), расположенное между двумя 5-этажными корпусами, удалённое от транспортных магистралей. Установлены требования к эксплуатации интерференционного эталонного компаратора:

- Температура эксплуатации $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ с допустимым изменением в рабочем пространстве в процессе измерения не более $0,5^\circ\text{C}$ при скорости измерения $0,1^\circ\text{C}$ за 30 с;
- Относительная влажность воздуха не должна превышать 80%;
- Скорость движения воздуха в рабочем пространстве не более 0,1 м/с;
- Частота возмущающих вибраций не более 10 Гц при амплитуде не более 0,0002 мм в горизонтальной плоскости и 0,0005 мм - в вертикальной;
- Проверка изоляции электропроводящих цепей на пробой напряжением 1100 В сопротивление клемм 0,1 Ом;
- Заземление электроприборов согласно требованиям безопасности.

Вся конструкция компаратора размещается на бетонной подушке глубиной не менее 1,5 м на стойках 2 (допускается изготовление бетонных столбов).

Для технологичности и приемлемой стоимости изготовления направляющие секции 5, 9 крепятся с помощью специальных регулируемых

стоек 63 и соединяются с помощью внутренних гаек и болтов 22, 34. Диаметры и прямолинейность направляющих имеют жесткие допуски для обеспечения плавности и прямолинейности перемещения каретки 3, на которой монтируется микроскоп для регистрации положения штрихов меры 26. Натяжение мер типа инварной проволоки или ленты осуществляется с помощью груза 11 через блок 4. Каретка 3 с помощью механизма точной установки 1 позволяет установить фоторегистрирующее устройство микроскопа на штрих меры. Величина перемещения каретки регистрируется с помощью углового отражателя 20 и ИПЛ (на рис. 2 не показан). В каретке 3 предусматриваются посадочные места для возможности крепления отражателя светодальномера или тахеометра для их калибровки при определении циклической поправки. В [3] рассматриваются вопросы модернизации компаратора для метрологического обеспечения поверки лазерных сканеров.

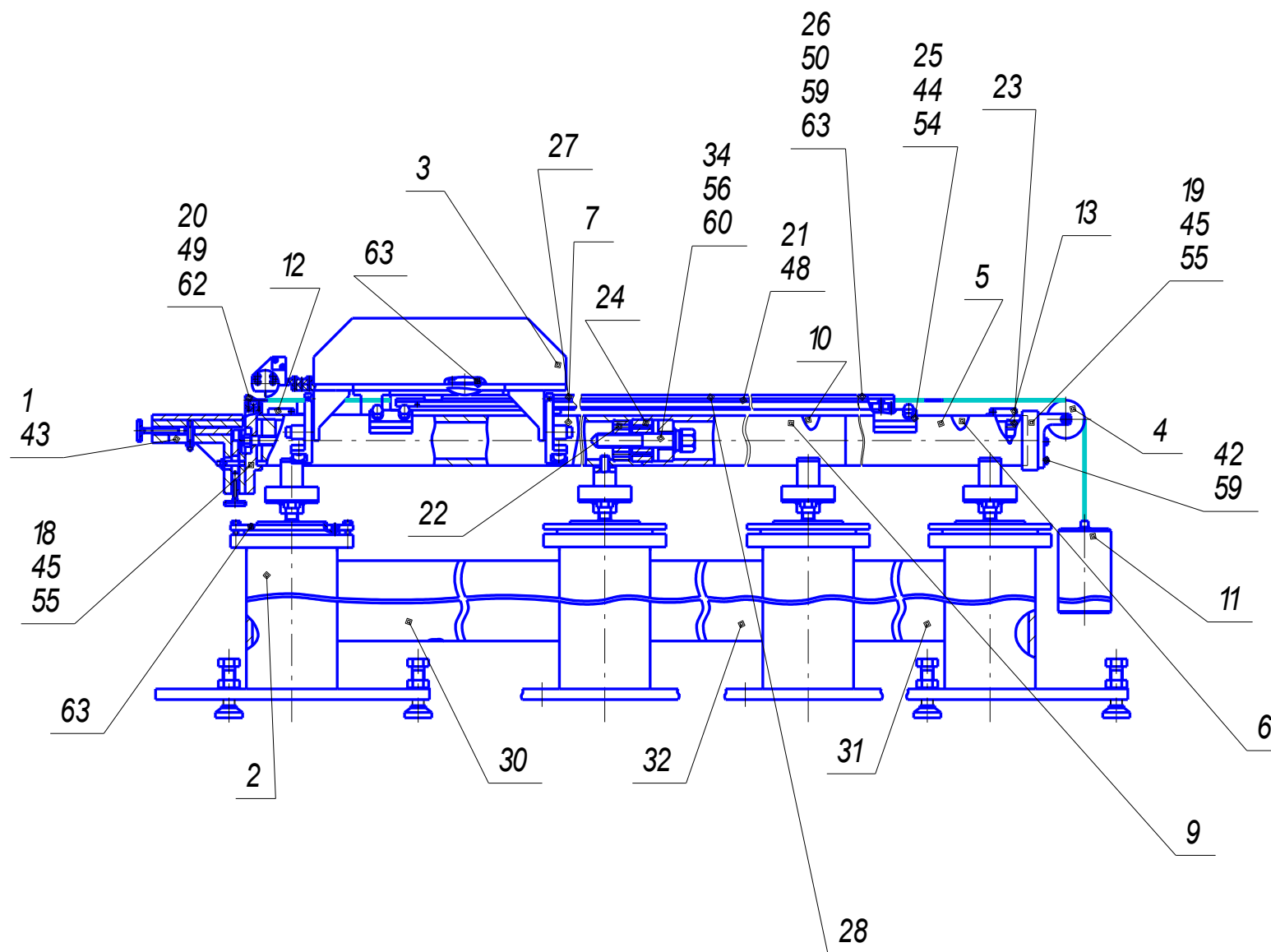


Рис. 2. Общий вид интерференционного компаратора СГГА

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методы и приборы высокоточных геодезических измерений в строительстве [Текст] / Под ред. В.Д. Большакова. - М.: Недра, 1976. - 335 с.
2. Круп Н.Я., Оптико-механические измерительные приборы. - М. - Л.: Машгиз, 1962. - 276 с.
3. Середович В.А., Методы метрологического обеспечения лазерных сканеров [Текст] / В.А. Середович, Л.Г. Куликова, В.Д. Лизунов // Сб. материалов конф. «ГЕО-Сибирь».- Новосибирск, СГГА (в печати).
© Л.Г. Куликова, В.Д. Лизунов, В.А. Середович, В.Т. Новоевский, А.В.Куликов, 2005

УДК 681.62.068.8:006.9

В.А. Середович, Л.Г. Куликова, В.Д. Лизунов

СГГА, Новосибирск

МЕТОДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ СКАНЕРОВ

Лазерно-локационное сканирование (ЛЛС) в настоящее время находит всё большее распространение для определения пространственных координат в геодезии и топографии и является самым значительным технологическим новшеством после внедрения в геодезическую практику навигационных систем GPS и ГЛОНАСС.

ЛЛС осуществляется двумя основными способами: получение информации при авиационном базировании лазерного локатора (ЛЛ) и при наземном базировании ЛЛ. При авиационном способе базирования местоположение и траектория движения лазерного локатора, то есть базовая точка или репер, регистрируются бортовым приёмником GPS. В случае наземного лазерного сканирования в первом приближении можно принимать как упрощённый вариант неподвижного сканера авиационного базирования. Перспективность такого подхода подтверждается, например [1]. В этом случае элементы внешнего ориентирования остаются неизменными в каждом сеансе измерений. Очевидно, что при наземном сканировании производительность получения информации уступает воздушному сканированию, однако при этом возможно получение значительно более детального изображения из-за свободы выбора ракурса и продолжительности сканирования, возможности съёмки внутренних элементов объектов и помещений.

Оба способа имеют преимущества и недостатки в зависимости от поставленной задачи. При оценке практического использования лазерной сканирующей системы (ЛСС) можно отметить преимущество наземных ЛС по отношению к воздушным в меньшей стоимости оборудования, а также в более высокой точности определения координат объектов за счёт статистического характера измерений и меньшей дальности объектов при сканировании. В общем случае при определении координат точек измеряемых объектов суммарная погрешность будет зависеть от погрешности базирования и определения дальностей с помощью ЛСС [2].

Для того чтобы объективно судить о точности производимых определений (измерений) с помощью ЛЛС, как для любых измерительных методов и систем,

необходимо метрологическое обеспечение, то есть комплекс мероприятий по обеспечению единства измерений.

Метрологические характеристики сканеров

Общие замечания

На основе вышеизложенного задача метрологического обеспечения ЛЛС распадается на две самостоятельные задачи:

- Метрологическое обеспечение при получении информации при авиационном базировании ЛЛС, то есть фактически поверка точности траектории движения приёмника GPS или ГЛОНАСС навигационных систем;
- Метрологическое обеспечение наземного лазерного сканера.

Вопросы метрологического обеспечения при использовании GPS приёмников достаточно изучены и имеют ряд действующих нормативных документов [3, 4], поэтому в настоящей работе не рассматриваются.

Лазерные сканеры авиационного и наземного базирования принципиально и конструктивно в современной форме имеют известные технологические решения. С некоторыми упрощениями такой прибор можно определить как сканирующий лазерный дальномер, где используется полупроводниковый лазер ближнего инфракрасного диапазона, работающий в импульсном режиме. В процессе сканирования лучом регистрируются наклонная дальность до точек отражения и значение угла, определяющего направление зондирующего луча в системе координат локатора. Лазерно-локационное изображение есть множество лазерных точек определённых пространственными координатами X, Y, Z, называемых «облаком точек», образующим некоторый образ наблюдаемой картины, называемой «лазерно-локационным изображением». При этом лазерные локаторы, в зависимости от технических характеристик, могут фиксировать несколько отражений для каждой линии визирования, что позволяет более информативно использовать полученные лазерно-локационные изображения. Например, в одном измерении в процессе сканирования могут быть получены сразу несколько откликов за счёт отражения листвы, растительности, проводов, опор линий электрических передач, кромок и элементов зданий, от поверхности земли или другой поверхности.

Очевидно, что условия получения информации в зависимости от расстояния до сканирующего объекта, угла поля зрения, точности определения расстояния (дальности), отражательная способность, граничные условия (форма объектов), условия окружающей среды, будут существенно сказываться на точности получаемой информации. Учитывая быстрое и широкое распространение и развитие лазерных сканирующих систем, изучение и разработка методов метрологического обеспечения при использовании их в геодезии весьма актуальны.

Оценка погрешности при измерении дальности

Погрешности сканерных измерений должны определяться при измерении расстояний от оптической оси или оптического центра сканирования камеры. Такую процедуру выполнить достаточно трудно из-за неопределённости центра оптического сканирования и механического принудительного центрирования при установке камеры. Поэтому для определения погрешности

измерений дальности могут быть использованы стенды или базисы с несколькими известными расстояниями, обеспечивающие более высокую точность в сравнении с ЛСС. При этом систематическая погрешность измерений будет присутствовать при каждом расстоянии, и её можно учесть в результатах измерений. Учитывая специфику работы сканера, обеспечивающего измерения дальности для элементов объекта, где сканирование производится под некоторым углом (наклонная дальность), возникает необходимость оценки погрешности измерений для углов, когда ещё можно получать достоверную информацию, то есть на пределе разрешения ЛЛС.

Используемые в настоящее время традиционные геодезические методы и средства измерений, инварные проволоки, светодальномеры, которые могут быть применены для создания и аттестации специальных стендов и базисов, малопригодны, непроизводительны, не обеспечивают требуемой точности.

В настоящее время для измерения расстояний и перемещений до 60 м всё шире применяются лазерные интерферометры, обеспечивающие погрешности измерений, не превышающие $(0,5 \div 1L)$ мкм в зависимости от условий измерений. На основе измерителей перемещений лазерных (ИПЛ) в настоящее время созданы и эксплуатируются специальные компараторы для поверки эталонных штриховых мер длины инварных проволок и лент. Например, на компараторе Института ядерной физики (ИЯФ) СО РАН в течение более 10 лет проводились измерения специальных штриховых мер длины, проведены исследования возможности использования такого компаратора для определения циклической поправки при выполнении линейных измерений с помощью светодальномеров и тахеометров с погрешностью измерений менее 1 мм.

Как показывают результаты исследований, время измерений и калибровки средств измерений значительно сокращается с одновременным существенным повышением точности.

Для разработки методов и средств, при оценке точности и поверке ЛСС в качестве основы для создания универсального компаратора использована схема, представленная на рис. 1.

На жестком бетонном фундаменте или на бетонных столбах располагаются направляющие (напр.). На одном из концов направляющей жестко устанавливается ИПЛ, который имеет юстировочные подвижки для выставления лазерной оптической оси. Направляющие для обеспечения технологичности сборки и легкости перемещения каретки (к) выполнены из точно обработанных труб. На каретке предусмотрено центрирующее устройство для лазерной сканирующей системы (ЛСС) и блок установки и юстировки трёхгранного отражателя (отр.) – призмы (trippelshpiegel).

Как видно из схемы, на краях направляющих располагают испытательные экраны – стенды (э), на одной из сторон экрана крепятся с возможностью перемещения и установки специальные миры (м) для регистрации их положения с помощью ЛЛС в установленных и измеренных положениях (x_1, x_2) и (y_1, y_2) . Комбинация установки размеров $(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, \dots, l_n)$, а значит, оптической оси ЛСС и измерение её положения с помощью ИПЛ, позволяет рассчитать наклонные дальности $(S_1, S_2, S_3, S_4 \dots S_n)$ и одновременно измерить

с помощью ЛСС. При регистрации наклонной дальности с помощью ЛСС выгодно применять широко используемые при измерениях в оптике миры, разработанные в Ленинградском (Санкт-Петербургском) государственном оптическом институте (ГОИ) и широко применяемые в промышленности и научных исследованиях по НО 1671-56. Миры применяются как испытательные тесты – штриховые и радиальные (рис. 2).

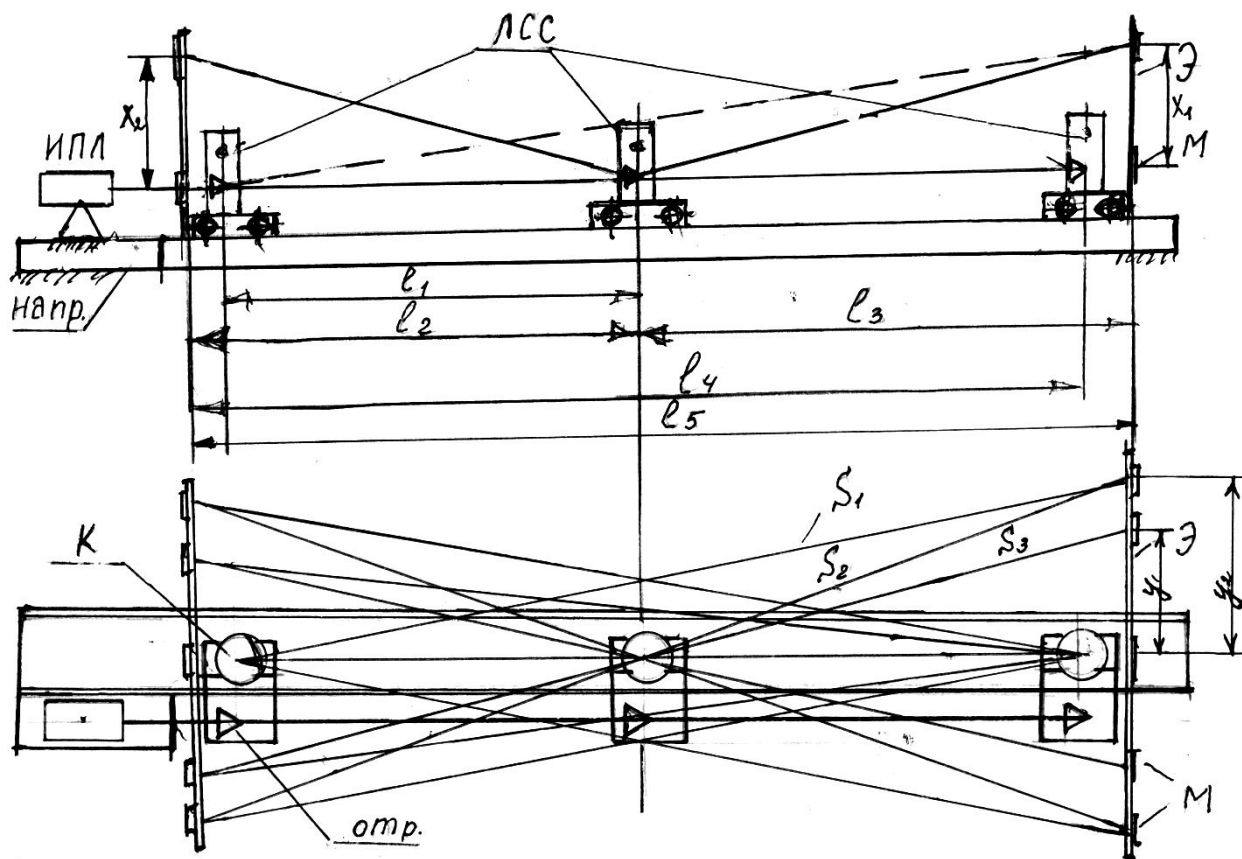


Рис. 1. Схема компаратора для поверки ЛСС:

ИПЛ - измеритель перемещений лазерный; ЛСС – лазерная сканирующая система; Э – экран; М – мира; отр – уголковый отражатель; $l_1 \div l_5$ - расстояние при перемещении ЛСС и экранов; $S_1 \div S_3 \div S_n$ – наклонные дальности; напр. – направляющая; К – каретка с ЛСС и отражателем; x_1, x_2 – расстояние между мирами в вертикальной плоскости; y_1, y_2 – расстояние между мирами в горизонтальной плоскости

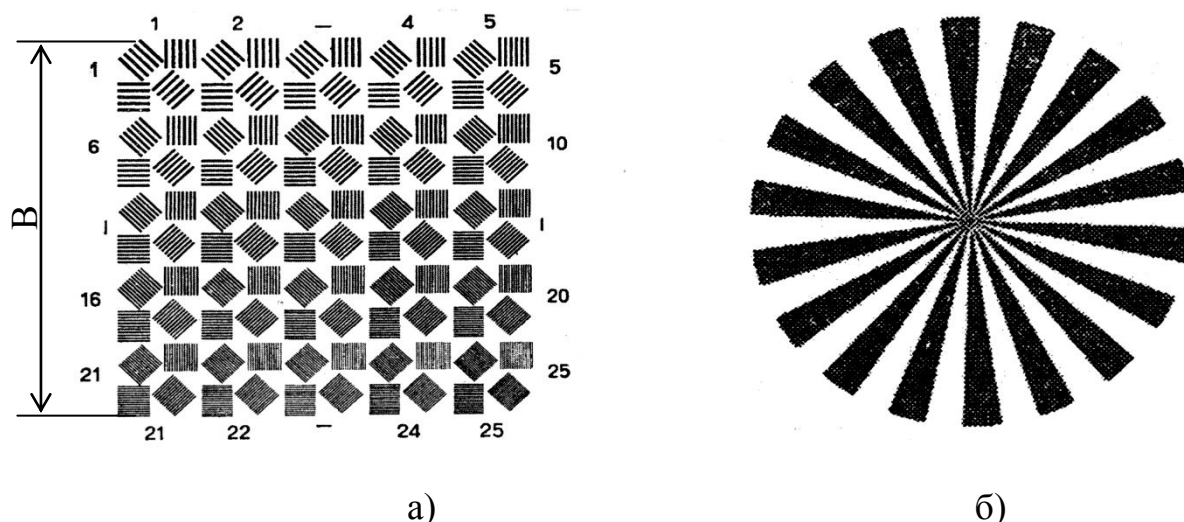


Рис. 2 – Испытательные миры:

а) – штриховая; б) – радиальная

Радиальные миры состоят из круга, выполненного на стекле или фотобумаге, разделённого на 36 или 72 прозрачных (белых) или непрозрачных (чёрных) секторов, что позволяет определить эффективный диаметр сканирующего пятна.

Штриховые миры имеют 25 элементов [5] из чёрных квадратов со штрихами разного направления. Ширина полос каждой миры убывает от элемента № 1 к элементу № 25 по закону геометрической прогрессии со знаменателем $\frac{1}{\sqrt[3]{2}} \approx 0,94$.

Число полос на 1 мм каждого номера миры составляет

Мира №	1	2	3	4	5	6
Наибольшее число полос – элемент № 25	200	100	50	25	12,5	6,3
Наименьшее – элемент № 1	50	25	12,5	6,5	3,1	1,56
База В в мм	1,2	2,4	4,8	9,6	19,2	38,4

При этом по номеру разрешаемого элемента миры и по базе В (номеру миры) вычисляют число линий на 1 мм R_N , то есть

$$R_N = \frac{60}{B} \cdot K_N, \quad (1)$$

где K_N – коэффициент, зависящий от номера элемента $K_N = 1,06^{N-1}$.

Использование приведённых мир позволяет эффективно оценить возможности ЛСС по качеству сканирования при нормальном падении зондирующих лучей и при различной, в том числе предельной, наклонной дальности.

Использование предлагаемого стенда при замене мир на экранах специальными объектами в виде ступенек, шаровых поверхностей, цилиндрических поверхностей, грани или полуплоскости с различными отражательными способностями позволит моделировать и исследовать программные продукты, поставляемые для ЛСС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Евстафьев О.В., SMARTSTATUON – Новый прибор компании LEICA GEOSYSTEMS [Текст] // Геопрофи. - 2005. - №1. - С. 40 - 42.
2. Середович В.А., Подходы к организации метрологической аттестации лазерных сканеров [Текст] / В.А. Середович, Л.Г. Куликова, В.Д. Лизунов // Вестник СГГА. - №10 (в печати).
3. МИ 2408-97. Рекомендация ГСИ. Аппаратура пользователей космических навигационных систем геодезическая. Методика поверки [Текст]. – Менделеево. – 1997.
4. МИ 2060-90. Рекомендация ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений длины в диапазоне $1 \cdot 10^{-6} \div 50$ м и длин волн в диапазоне $0,2 \div 50$ мкм [Текст]. – М.: Госстандарт, 1991.
5. Мальцев М.Д., Прикладная оптика и оптические измерения [Текст]/ М.Д. Мальцев, Г.А. Каракулина. - М.: Машиностроение, 1968.

© В.А. Середович, Л.Г. Куликова, В.Д. Лизунов, 2005

УДК 528.511

А.В. Куликов, В.Д. Лизунов

СГГА, Новосибирск

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОВЕРКИ ЭТАЛОННОГО БАЗИСНОГО ПРИБОРА СГГА

Эталонный базисный прибор СГГА относится к подвесным мерным приборам, предназначенным для высокоточных линейных измерений, в том числе, линейных базисов. Эталонный базисный прибор представляет собой оборудование, состоящее из восьми инварных проволок длиной 24 м и трёх инварных ленточек длиной 6 м, пары блоков с блочными станками и грузами, комплекта базисных штативов с целиками, оптического центрира и базисной (нивелирной) рейки. Инварная проволока обладает малым коэффициентом линейного расширения и служит для непосредственного измерения линий. Инварной лентой измеряют остатки линий, меньше 24 м. Длина эталонного линейного базиса СГГА - 1054 м. Отсчёты по шкалам проволоки берут одновременно два наблюдателя. Каждый отрезок линейного базиса измеряют несколькими проволоками для уменьшения погрешностей измерений между геодезическими знаками столбов. Относительные превышения, необходимые для вычисления горизонтальных проложений измеренных участков линии, определяют нивелированием. Бригада исполнителей при работе с базисным прибором состоит из восьми человек.

Процесс измерения мерными проволоками известен [1], поэтому рассмотрим только некоторые особенности этого вида работ.

Ошибка учета температуры мерной проволоки – один из главных источников погрешностей при высокоточных линейных измерениях. Обычно за температуру проволоки принимают температуру воздуха, измеренную термометром-пращом. Однако мерные проволоки, обладающие коэффициентом поглощения энергии, отличным от коэффициента поглощения окружающей ее

среды, имеют температуру, отличающуюся от температуры воздуха. Это отличие меняется с изменением условий измерений.

Проволока обладает малой температурной инерцией и быстро (скачками) воспринимает изменение температурного режима. Так, порыв ветра изменяет ее температуру на $(1-2)^{\circ}\text{C}$, а набежавшее на солнце облако – до 3°C , хотя при этом температура воздуха по измерениям термометром-пращом остается без изменения.

В отличие от измерений термометром-пращом, результаты измерения температуры воздуха ртутным термометром, установленным неподвижно на уровне проволоки, оказываются ближе к температуре проволоки. Заметного различия между показаниями неподвижного термометра и температурой проволоки не наблюдается.

Эталонирование инварных проволок и лент СГГА производится на 24-метровом интерференционном компараторе Института ядерной физики (ИЯФ) СО РАН. Метод измерения длины инварной проволоки - абсолютный интерференционный и составляет: $\text{СКП} = (1+0,5L)$ мкм. Такая точность обеспечивается техническими возможностями интерференционного 24-метрового компаратора ИЯФ: $\text{СКП} = (0,01 + 0,5L)$ мкм, так как главной составляющей компаратора ИЯФ является лазерная измерительная система HP5529A фирмы Agilent США.

Основные технические характеристики данной системы следующие:

Предел измерения длины S, м	60
Дискретность отсчета, мкм	0,01
Относительная погрешность измерения, $10^{-7}S$, мкм	5
Допустимая скорость перемещений, м/мин	18.

В данном докладе основное внимание уделено влиянию температуры на действительное значение длины инварных проволок и лент. В табл. 1 приведены результаты исследования проволок и лент, проводимых в ИЯФ на протяжении четырёх лет.

В результате исследования проволок обнаружилось, что при изменении температуры необходимо дополнительно вводить поправку ($\Delta L_{\text{ср}}$) примерно равную 0,05 мм, в действительное значение длины проволоки

$$L_{\text{д}} = L_{\text{изм.}} \pm \Delta L. \quad (1)$$

Действительную длину для нормальных условий компарирования проволоки вычисляют как:

$$L_{\text{д}} = L_{\text{т}} - \alpha (t_{\text{изм}} - 20^{\circ}\text{C}) L_{0-1}, \quad (2)$$

где $L_{\text{т}}$ - длина проволоки при $t_{\text{изм.}}$;

α – температурный коэффициент удлинения инвара;

$\alpha = (1,2 \cdot 10^{-6} \text{ на } 1^{\circ}\text{C}) \text{ мкм};$

L_{0-1} - длина интервала проволоки при температуре измерения t .

В СГГА разработана локальная поверочная схема для передачи единицы измерения длины от эталонов длины к рабочим средствам измерения длины, в докладе отмечается только передача единицы длины от интерференционного компаратора ИЯФ к инварным проволокам, которыми поверяется эталонный

линейный базис СГГА со средней квадратической погрешностью (СКП), определяемой как:

$$\text{СКП} = (0,3 + 2 \cdot 10^{-6})L, \quad (3)$$

где L – длина базиса в метрах.

Эталонный линейный базис СГГА используется для поверки светодальномеров, электронных тахеометров и других геодезических средств измерения длины с СКП, определяемой выражением (4):

$$\text{СКП} = (1 + 2 \cdot 10^{-6})L. \quad (4)$$

В результате проделанных исследований можно сделать вывод, что на точность передачи единицы длины существенно влияет изменение проволоки в результате нестабильности температуры окружающей среды. Кроме того, отмечена значительная нестабильность полученных результатов аттестации проволок, в то же время, погрешность аттестации основного элемента компаратора лазерного измерителя перемещений. Отсюда можно сделать вывод о необходимости модернизации системы регистрации положения штрихов мер, так как применяемый метод регистрации является контактным. Более подробно результаты исследований изложены в отчёте о НИР [2] по теме «Грант» Т02-03.4-3021 за 2005 г.

Таблица 1. Ошибка учета температуры мерной проволоки

№ проволочки, ленты	Диаметр, L (м)	Действительные значения, полученные при $t_{из.}$ по годам													
		2000			2002			2004			Средняя арифметическая для L_{20} $С^{\circ}(ММ)$	ΔL_1 Поправка 2000	ΔL_2 Поправка 2002	ΔL_3 Поправка 2004	$\Delta L_{ср}$ Средняя поправка
		Лиз. (мм)	тиз. $С^{\circ}$	L_{20} $С^{\circ}(ММ)$	Лиз. (мм)	тиз. $С^{\circ}$	L_{20} $С^{\circ}(ММ)$	Лиз. (мм)	тиз. $С^{\circ}$	L_{20} $С^{\circ}(ММ)$					
5697	24	24000,655	23,5	24000,613	24000,618	20,5	24000,612	24000,699	22,5	24000,669	24000,631	0,018	0,019	0,038	0,025
5692	24	23999,982	23,5	23999,940	23999,950	21,7	23999,929	24000,043	22,9	24000,008	23999,959	0,019	0,030	0,005	0,018
3291	24	23998,544	23,5	23998,502	23998,532	23,9	23998,476	23998,584	22,8	23998,550	23998,509	0,007	0,033	0,041	0,027
687	6	6001,488	23,5	6001,446	6001,432	24,8	6001,374	6001,541	24,1	6001,491	6001,437	0,010	0,063	0,054	0,042
92	6	6000,076	23,5	6000,034	6000,090	24,6	6000,035	6000,149	23,8	6000,103	6000,057	0,023	0,022	0,046	0,031
138	6	6001,285	23,5	6001,243	6001,245	25,2	6001,183	6001,337	23,7	6001,293	6001,240	0,003	0,057	0,053	0,038
6713	24	24000,473	23,5	24000,431	24000,500	21,7	24000,480	24000,532	22,7	24000,500	24000,470	0,039	0,010	0,030	0,026
6707	24	24000,685	23,5	24000,643	24000,683	24,3	24000,631	24000,78	22,8	24000,746	24000,673	0,030	0,042	0,073	0,049
6847	24	24000,206	23,5	24000,164	24000,186	24,4	24000,133	24000,328	22,5	24000,298	24000,198	0,034	0,065	0,100	0,067
4667	24	24000,201	23,5	24000,159	24000,196	21,7	24000,176	24000,259	22,7	24000,227	24000,187	0,028	0,011	0,040	0,027
6686	24	24000,616	23,5	24000,574	24000,621	20,9	24000,610	24000,654	22,7	24000,622	24000,602	0,028	0,008	0,020	0,019

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методы и приборы высокоточных геодезических измерений в строительстве [Текст] / Под ред. В.Д. Большакова. - М.:Недра,1976.-335 с.

2. Разработка теоретических основ и методов создания эталонных компараторов для метрологической аттестации специальных штриховых мер длины [Текст]: отчёт о НИР (заключ.) СГГА; рук. А.В. Середович. - Испол. В.Д. Лизунов, Л.Г. Куликова, В.Т. Новоевский, А.В. Куликов, А.В. Полянский. - Новосибирск, 2005.- № ГР 01.2003.12823.

© А.В. Куликов, В.Д. Лизунов, 2005

УДК 681.784.23

В.Д. Лизунов

СГГА, Новосибирск

РЕФРАКТОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПРОЗРАЧНЫХ СРЕД

Известно, что основными инструментами, используемыми сегодня для высокоточных измерений длины, являются лазерные интерферометры перемещений (ИПЛ). Такие приборы измеряют длину методом счета числа интерференционных полос при перемещении одного из отражателей интерферометра, при этом расстояние между полосами, равное половине длины волны лазера, существенно зависит от абсолютного показателя преломления атмосферы (воздуха). Например, абсолютную точность измерений длины $1 \cdot 10^{-7}$ можно получить только при коррекции вакуумной длины волны лазера на действительное отклонение показателя преломления воздуха, определенное с точностью не менее $1 \cdot 10^{-7}$.

Как показывают патентные исследования и публикации, в настоящее время в большинстве случаев в производстве и лабораторных исследованиях используется косвенный способ определения абсолютного показателя преломления с помощью формулы Эдлена [1] на основе измерений температуры, давления, влажности и содержания CO_2 . Погрешность определения показателя преломления по формуле большинством исследователей оценивается величиной $5 \cdot 10^{-8}$. Достижение такой точности требует особых условий и много времени. Поэтому передовые метрологические лаборатории стран Европейского содружества (ЕС) в настоящее время уделяют большое внимание исследованиям, направленным на совершенствование и создание практических рефрактометров, которые могут быть применены в производстве.

Результаты сличений высокоточных рефрактометров в национальных лабораториях передовых стран Европы [2] и состояние разработки и выпуска рефрактометров для определения показателя преломления воздуха [3] показывают, что возможно получение точности измерений абсолютного показателя преломления $3 \cdot 10^{-8}$, т.е. значительно лучше косвенного метода с использованием формулы Эдлена.

Однако, предложенные и рассмотренные выше конструкции рефрактометров могут быть применены лишь в специальных лабораторных

условиях и «привязаны» к вакуумным насосам, сильно зависят от места их использования и точности определения процентного содержания CO_2 в воздухе.

В СНИИМ, совместно с ЧСМУ (ЧССР), проводились разработки и исследования рефрактометров, которые могут обеспечить погрешность измерений не более $3 \cdot 10^{-8}$, имеют большую производительность и возможность перемещений по измеряемой трассе. Учитывая идеи, предложенные и достигнутые авторами [4, 5], были опробованы несколько вариантов «отпаянных» рефрактометров, один из них приведен в [6]. Экспериментальные исследования, проведенные с измерительными системами перемещений в рефрактометре, обеспечивающими даже невысокую точность, дали хорошие результаты и подтвердили правильность выбранного варианта.

В конструкциях рефрактометров использовался прямой метод измерения показателя преломления среды « n_{cp} » интерферометром с двумя каналами прохождения света одинаковых геометрических путей « l » в средах с известным « n_0 » и измеряемым « n_{cp} ». Выражая разность « Δn » через порядок интерференции « N », а длину волны используемого излучения через « $\lambda_{\text{вак}}$ », имеем

$$\Delta n_{cp} = n_{cp} - n_0 = \frac{N \cdot \lambda_{\text{вак}}}{\Delta l}. \quad (1)$$

При этом « Δn » получают или в процессе «метода замещения» вакуума исследуемой средой или с помощью компенсаторов оптической разности хода, т.е. «нулевым методом». Для показателя преломления среды имеем

$$n_{cp} = \frac{N \cdot \lambda_{\text{вак}}}{m \cdot \Delta l} + 1, \quad (2)$$

где m – постоянная интерферометра (разрешение).

На рис. 1 представлен один из первых вариантов конструкции рефрактометра, на котором были проведены и подтверждены возможности создания «отпаянного», т.е. не связанного с вакуумным постом, переносного долговременного использования устройства.

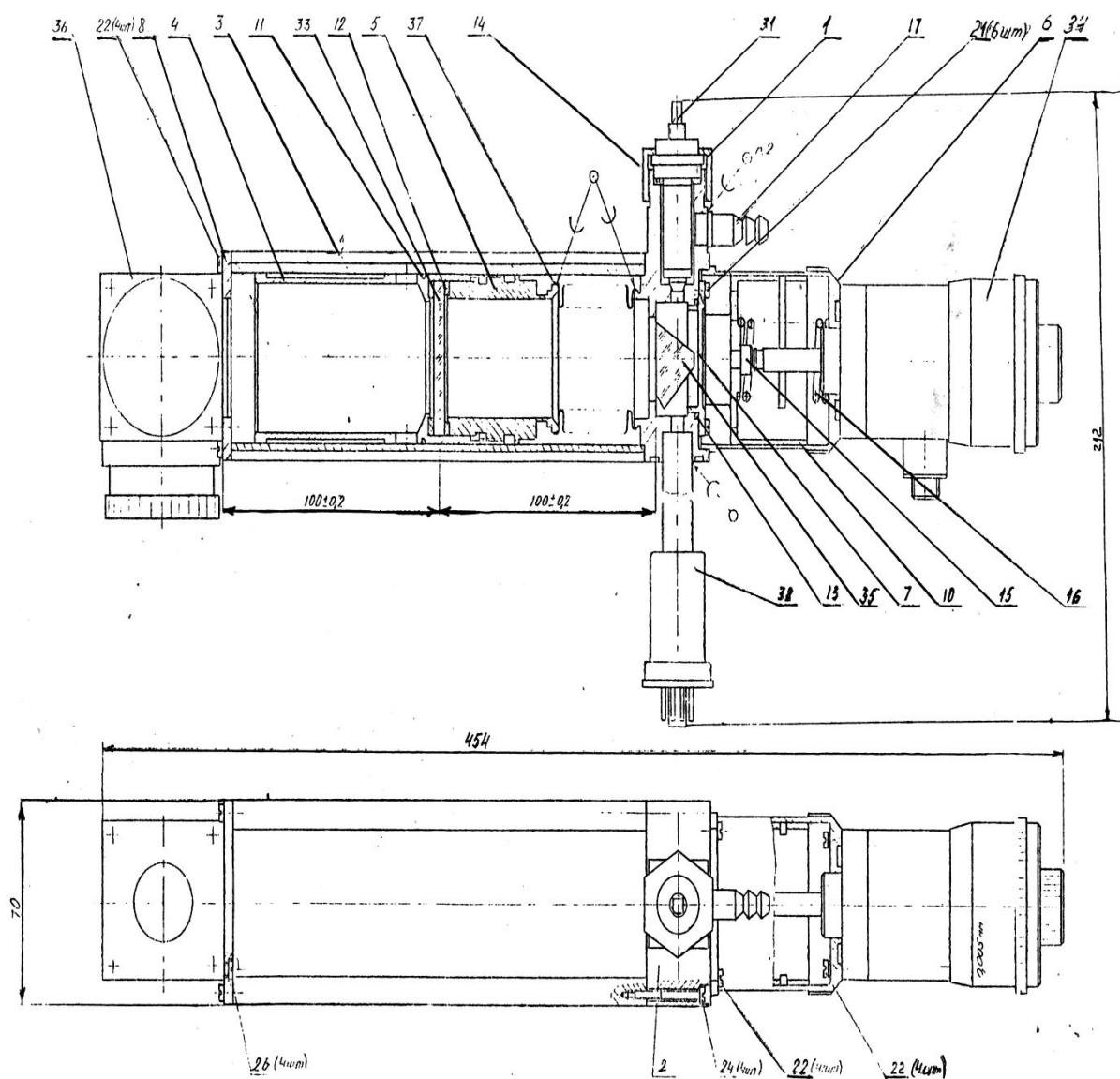


Рис. 1. Общий вид рефрактометра

Вся конструкция рефрактометра выполнена в едином корпусе 2, на котором крепится, с одной стороны, микровинт 34, позволяющий измерить перемещение разделительной пластины 33 вакуумной камеры с изменяемыми размерами 5, выполненной с помощью двух стальных сильфонов 37, обеспечивающих вакуум. Измерение вакуума производится с помощью вакуумной лампы 32 (ПМТ-4М). Откачка вакуума производится через штуцер 17 с вентилем 31.

На другой стороне корпуса конструкции закреплен интерферометр 36 измерителя перемещений лазерного типа ИПЛ-30К1. В качестве второго измерительного плеча интерферометра используется закрепленная в корпусе вакуумной камеры призма 35. Корпус рефрактометра имеет достаточную жесткость и может крепиться совместно с интерферометром на массивном основании. Жесткое крепление всей оптической системы в единый корпус позволяет избежать погрешностей измерений от деформации корпусных деталей в процессе измерения длины вакуумной камеры.

В следующей конструкции рефрактометра были учтены недостатки измерительной части перемещения стенки при изменении вакуумной камеры, где был применен дополнительный интерферометр от одного источника света.

На рис. 2 изображен рефрактометр для измерения показателя преломления прозрачных сред с двойным интерферометром.

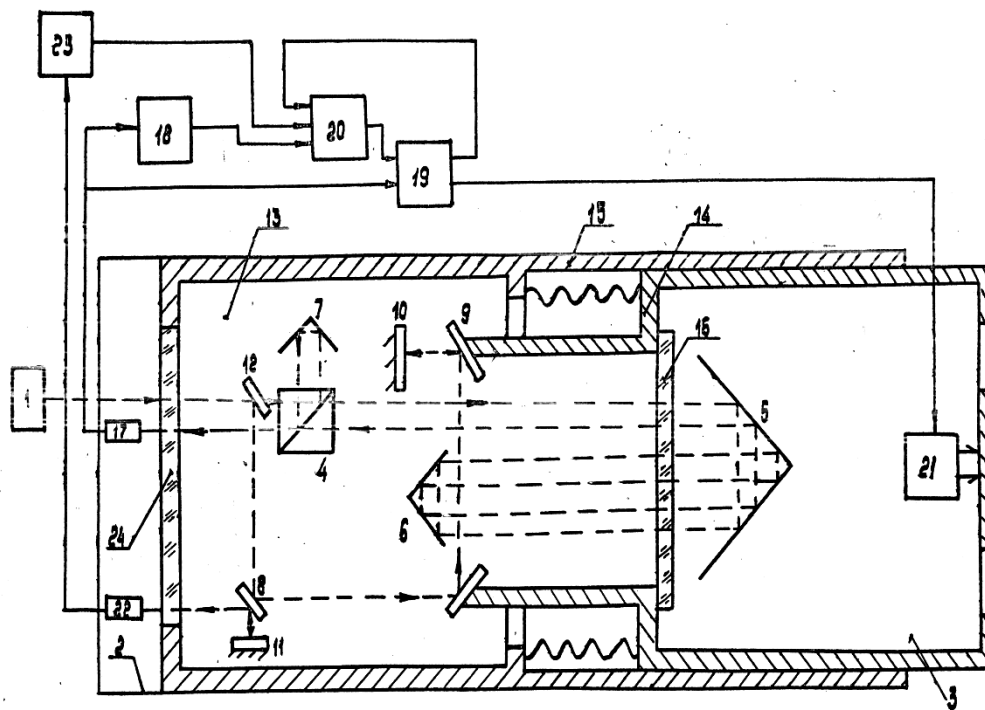


Рис. 2.- Рефрактометр с двойным интерферометром

Рефрактометр содержит источник монохроматического света 1, корпус 2, рабочую камеру 3 с исследуемой средой, основной интерферометр, выполненный по схеме Майкельсона, который состоит из светоделительного элемента 4, зеркала в виде углового отражателя 5, обратного отражателя 6 и зеркала в виде углового отражателя 7 в нерабочем плече, вспомогательный интерферометр, выполненный по схеме Майкельсона, который состоит из светоделительного элемента 8, прямоугольного отражателя 9, зеркал 10 и 11.

Оптические оси основного и вспомогательного интерферометров и источника 1 пересекаются на светоделительном элементе 12 и лежат в одной плоскости. Вакуумная камера 13 имеет подвижную стенку 14, которая перемещается по аксиальным направляющим 15, с окном 16, делящим основной интерферометр на две части – вакуумную и с исследуемой средой, на подвижной стенке 14 закреплен прямоугольный отражатель 9, основные (4, 5, 6, 7) интерферометры расположены внутри вакуумной камеры за исключением углового отражателя 5 основного интерферометра. Выход основного интерферометра оптически связан с системой считывания интерференционных полос 17, выход системы считывания интерференционных полос 18 основного интерферометра и с одним из входов схемы управления приводом 19, выход счетчика числа интерференционных полос 18 электрически связан с одним из входов микроЭВМ 20, выход микроЭВМ 20 электрически связан со входом

схемы управления приводом 19. Один из выходов схемы управления приводом 19 электрически связан с приводом 21, который механически связан с подвижной стенкой 14 вакуумной камеры 13. Другой выход схемы управления приводом 19 электрически связан с одним из входов микроЭВМ 20.

Система считывания интерференционных полос 17 основного интерферометра, схема управления приводом 19 и привод 21 образуют цепь автоподстройки оптической длины основного интерферометра (4, 5, 6, 7).

Выход вспомогательного интерферометра оптически связан с системой считывания 22 вспомогательного интерферометра, выход которой электрически связан с входом счетчика интерференционных полос 23 вспомогательного интерферометра. Выход счетчика полос 23 вспомогательного интерферометра электрически связан с одним из входов микроЭВМ 20.

МикроЭВМ 20 по программе осуществляет управление приводом 21 с помощью устройства управления приводом 19 и обрабатывает результаты измерения, полученные со счетчиков 23 и 18 после прихода сигнала готовности со схемы управления приводом 19 на вход микроЭВМ 20.

Оптическая длина основного интерферометра складывается из оптических длин вакуумной и измеряемой частей интерферометра и оптической толщины окна.

Устройство работает следующим образом. Излучение от источника монохроматического света 1 поступает через окно 24, делится светоделительным элементом 12 на два пучка, один из которых направляется на основной интерферометр, а другой – во вспомогательный, служащий для измерения величины перемещения окна 16. Система считывания интерференционных полос 17 основного интерферометра в соответствии с оптическими сигналами, поступающими с выхода основного интерферометра, вырабатывает электрический сигнал, который через схему управления приводом 19 воздействует на привод 21. Привод 21, перемещая подвижную стенку 14 вакуумной камеры 13 с окном 16 по аксиальным направляющим 15, изменяет оптическую длину основного интерферометра и настраивает на максимум интерференционной полосы.

После настройки интерферометра на максимум интерференционной полосы со схемы управления приводом 19 на выход микроЭВМ 20 поступает сигнал готовности. МикроЭВМ 20 запоминает текущие показания счетчика 23, вспомогательного интерферометра и счетчика 18 основного интерферометра, после чего микроЭВМ 20 разрывает кольцо автоподстройки длины основного интерферометра и дает команду на схему управления приводом 19, привод 21 перемещает стенку 14 вакуумной камеры 13 с окном 16, при этом оптическая длина основного интерферометра монотонно изменяется.

При измерении оптического пути на некоторую, заранее заданную величину, по сигналу с выхода счетчика 18 на вход микроЭВМ 20, микроЭВМ 20 дает команду на замыкание кольца автоподстройки оптической длины основного интерферометра, и устройство управления привода 19 с помощью привода 21 снова настраивает основной интерферометр на максимум интерференционной полосы. После настройки основного интерферометра на

максимум интерференционной полосы со схемы управления приводом 19 на выход микроЭВМ 20 поступает сигнал готовности. МикроЭВМ 20 считывает показания счетчиков 23 и 18 вспомогательного и основного интерферометров. По начальным и конечным показаниям счетчиков 23 и 18 вспомогательного и основного интерферометров микроЭВМ 20 вычисляет показатель преломления среды.

Предлагаемый рефрактометр позволяет измерять показатель преломления среды с высокой точностью благодаря установке в вакуумную камеру основного и вспомогательного интерферометров и введения в рабочее плечо основного интерферометра дополнительного уголкового отражателя.

Данное преимущество дает возможность использовать такой рефрактометр для автоматического ввода поправки на внешние условия при высокоточных линейных и угловых измерениях, которые производятся на образцовых и эталонных средствах.

Преимущества «отпаянного» рефрактометра в том, что достаточно долго в вакуумной камере можно сохранять требуемые условия, прибор без вакуумных насосов может перемещаться на достаточно большие расстояния, может перевозиться, легко автоматизируется процесс измерения показателя преломления, и с помощью микропроцессора или ЭВМ осуществляется ввод поправок в лазерный интерферометр. Легко может быть аттестован или сличен в другой лаборатории.

Кроме приведенных выше преимуществ, рефрактометр может легко быть трансформирован для измерения показателя преломления прозрачных газов и жидкостей, для контроля устройств, создающих анестезию в медицине. При внедрении в метрологические службы лабораторий и предприятий может дать большой экономический эффект.

При измерении показателя преломлений агрессивных сред рефрактометр может быть выполнен из химически стойких материалов, а при герметизации источника излучения рефрактометр может использоваться для измерения показателя преломления взрывчатых сред.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. B.Edlen, The refractive index of air, Metrologia 2, 71-80 (1966).
2. P. Schellekens, T. Wilkinig, F. Beinloth, M. I.Downs, K.P. Birch, and I. Spronk, Measurements of the refractice index of air using interference refraktometers, Metrologia 22, 279-287 (1986).
3. R. Thralmann and W.Hou.Development of a high accuracy air refraktometer, International Symposium on Dimensional Metrology in Produktion and Qality Control ISMOS, Iune, 1992, Tampere, Finland.
4. F. Petru, B. Popela, Zpusov a zarizeni k miereni indexu lomu kapalneho a Plynného prostredi v merne draze laser- interferometru, Patentovypis N 148722, 1973, CSFR
5. А.с. № 1117493Ф. СССР. Интерференционный способ измерения оптического показателя преломления газов и жидкостей [Текст] / В.М. Хавинсон. - 1984.
6. А.с. № 1700357. СССР. Устройство для измерения показателя преломления прозрачных сред / В.Д. Лизунов, В.М. Весельев, И. Мокрош (ЧССР), А.А. Бородин. - 1990.

СОДЕРЖАНИЕ

Anurjew M E., Brandner J.J., Hansjosten E., Schygulla U., Schubert K. Mikroverfahrenstechnik und Rapid Prototyping im forschungszentrum karlsruhe (Микроструктуртехника и Рапид Прототупинг в исследовательском центре Карлсруэ).....	3
Чугуй Ю.В., Верхогляд А.Г., Голубев И.В., Кирьянов В.П., Кучинский К.И., Обидин Ю.В., Плотников С.В., Ступак М.Ф., Сысоев Е.В., Финогенов Л.В., Юношев В.П. 3D оптические измерительные технологии для научных и промышленных применений.....	10
Поллер Б.В. Ультрафиолетовые лазерные информационные системы. Состояние и перспективы развития	21
Филатов Ю.В. Современное состояние метрологии угловых измерений ...	24
Зуев Л.Б., Горбатенко В.В., Семухин Б.С. Методы оценки предельных состояний металлов и сплавов и аппаратура для их реализации	26
Рахманова Ю.Г. Двухспектральный зеркально-линзовый объектив с переменным фокусным расстоянием	37
Алдохин П.А., Рафаилович А.С. Телевизионные системы для ультрафиолетовой области спектра.....	42
Майоров А.П., Шамаев П.П. Лазерная установка для обработки алмазного материала	47
Рафаилович А.С., Шлишевский В.Б. Малогабаритный двойной растровый монохроматор	50
Рафаилович А.С. Объекты исследования и параметры исследовательской аппаратуры для ультрафиолетовой области спектра	52
Шойдин С. А., Кондаков В.Ю. Голографический бытовой осветительный прибор.....	57
Шойдин С. А., Кондаков В.Ю. Голографический прицел - целеуказатель .	60
Шатунов К.П., Баринов А.А., Тымкул Л.В. Измерение характеристик объективов тепловизионных систем	61
Плотников С.В., Байбаков А.Н., Гуренко В.М., Патерикин В.И., Юношев С.П., Сотников В.В., Чугуй Ю.В. Лазерный диагностический комплекс для контроля колесных пар вагонов на ходу поезда.....	64
Борисек А.С., Кальницкий А.В. Новые гипотезы о строении и функционировании первого отдела зрительного анализатора	71
Зебрева К.А., Чугуй Ю.В. Расчет дифракционных явлений на 3D объектах постоянной толщины при освещении плоскими и сферическими волнами	75
Кирьянов В.П. Высокоточные системы контроля углоизмерительных структур на прозрачных носителях.....	81
Банчило И.Н. Система слияния изображений в видимой – ближней ИК и дальней ИК области без параллакса.....	91
Егоренко М.П. Разработка многоспектрального зеркально-линзового объектива.....	93

Батомункуев Ю.Ц. Применение метода многократной дифракции в оптических устройствах	99
Чесноков Д.В., Чесноков А.Е. Перестраиваемый миниатюрный монокроматор в микромеханическом исполнении для целей экспресс- анализа.....	103
Рахимов Н.Р., Шамирзаев С.Х. Оптоэлектронная система для измерения толщины листового стекла	107
Серьезнов А.Н., Рахимов Н.Р., Холматов С.А. Принцип определения содержания одного вещества в другом на основе оптоэлектронного преобразователя.....	111
Костюченко В.Я., Протасов Д.Ю. Диагностика параметров неравновесных носителей в Р-КРТ методом магнитофотопроводимости	114
Перминов В.П. Новые достижения в магнетермии.....	120
Батомункуев Ю.Ц. Расчет голограммных линз на основе зеркально- линзовой модели (часть 1).....	123
Ефремов В.С. Многоспектральные оптические устройства.....	127
Поллер Б.В., Бритвин А.В., Удальцов Е.В., Коняев С.И., Щетинин Ю.И. О применении ультрафиолетовых лазерных систем для определения координат объектов вне прямой видимости	130
Малинин В.В. Соотношения между размерами файла цифрового изображения и параметрами периферийных устройств	133
Поллер Б.В., Бритвин А.В., Голубенков А.А., Удальцов Е.В., Игнатович С.М. Характеристики специальных оптических волноводов для определения координат и скорости перемещения ультрафиолетовых излучателей	138
Симонова Г.В. Хлебникова Е.П. Сравнительный анализ спектральных характеристик природных и тестовых объектов.....	144
Толстиков А.С. Исследования и оптимизация систем координатно- временных определений	147
Макаров И.Е., Носков Ю.В., Толстиков А.С. Опыт применения аппаратуры Javad Legacy для траекторных и частотно-временных определений	152
Коломников Ю.Д., Поллер Б.В., Коняев С.И., Могильницкий Б.С. О лазерном излучателе технологического назначения.....	157
Могильницкий Б.С., Тиссен В.М., Толстиков А.С. Алгоритм обработки данных ИСЗ навигационных систем глонасс и GPS: определение ПВЗ	162
Могильницкий Б.С., Тиссен В.М., Толстиков А.С. Параметры вращения Земли: технологии обработки данных	166
Толстиков А.С., Ханин А.Г. Синтез стабильных фильтров Калмана в задаче улучшения ЭВО.....	172
Черепанов В.Я. Разработка методов и средств метрологического обеспечения измерений коэффициентов теплового излучения материалов	176

Пальчун Ю.А., Егиазарян Г.Г., Енин А.Н., Серых В.И. Результативность систем менеджмента качества предприятий и их метрологических служб	182
Енин А.Н. Выбор контролируемых параметров при производстве радиоэлектронной аппаратуры	183
Карманов И.Н., Мещеряков Н.А. Метрологическое обеспечение оптических измерений увлажненности различных материалов	188
Карманов И.Н., Мещеряков Н.А. Применение широкополосных поглощающих фильтров и дисперсионных элементов для частотной селекции лазерного излучения	193
Батомункуев Ю.Ц., Дульянинов А.С., Мещеряков Н.А. Способы контроля чистоты поверхностей	197
Батомункуев Ю.Ц., Дульянинов А.С., Мещеряков Н.А. Качество уборки в клиринговых технологиях и их метрологическое обеспечение	200
Шувалов Г.В., Колесникова К.О. Исследование метрологических характеристик метода определения воды в нефтепродуктах	203
Шувалов Г.В., Милехина Е. В. Использование барботажной системы для определения плотности нефтепродуктов.....	205
Украинко В.М. Интерференционный прибор для эталонирования высокоточных уровней, нивелиров и кренометров	207
Балахненко А.Ю., Тиссен В.М., Толстиков А.С. О результатах прогнозирования неравномерностей вращения Земли	210
Карманов И.Н., Мещеряков Н.А. Суммирование систематической и случайной погрешности измерений, распределенных по нормальному закону.....	214
Куликова Л.Г., Лизунов В.Д., Середович В.А., Новоевский В.Т., Куликов А.В. Особенности построения интерференционного компаратора для исследования и поверки геодезических СИ	217
Середович В.А., Куликова Л.Г., Лизунов В.Д. Методы метрологического обеспечения лазерных сканеров	222
Куликов А.В., Лизунов В.Д. Исследование результатов поверки эталонного базисного прибора СГГА.....	227
Лизунов В.Д. Рефрактометр для измерения показателя преломления прозрачных сред	231