

## **МЕТОДИКИ ТОЧНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ВЫСОКОТОЧНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ДИНАМИЧНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ. СОСТАВ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

### ***Ирина Александровна Аникеева***

АО «Роскартография», 109316, Россия, г. Москва, Волгоградский пр., 45, стр. 1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник; ООО «Сигма Метрикс», 105064, Россия, г. Москва, ул. Земляной вал, 34А, e-mail: ia.anikeeva@roscartography.ru

### ***Иван Владимирович Анохин***

АО «Российские космические системы», 111250, Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53, техник

### ***Владимир Степанович Вдовин***

АО «Российские космические системы», 111250, Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53, начальник отдела, e-mail: contact@spacescorp.ru

### ***Вадим Федорович Иванов***

АО «НИИАС», 196006, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 115 «А», начальник отдела

### ***Александр Петрович Карник***

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор, ректор, тел. (383)343-39-37, e-mail: rectorat@ssga.ru

### ***Мария Сергеевна Кузнецова***

АО «Российские космические системы», 111250, Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53, инженер-исследователь

### ***Антон Владимирович Лаврухин***

АО «Российские космические системы», 111250, Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53, инженер-исследователь

### ***Леонид Алексеевич Липатников***

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, ведущий инженер, тел. (923)227-89-57, e-mail: lipatnikov\_l@mail.ru

### ***Павел Александрович Попов***

АО «НИИАС», 196006, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 115 «А», директор Санкт-Петербургского филиала, e-mail: p.popov@vniias.ru

### ***Андрей Сергеевич Рублёв***

АО «Российские космические системы», 111250, Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53, техник

### ***Виталий Геннадьевич Сернов***

АО «Российские космические системы», 111250, Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53, начальник отделения

В статье приведен краткий обзор разработанных авторами и прошедших апробацию методик точностных испытаний различных образцов НАП-В динамичных потребителей и основных результатов испытаний по этим методикам в различных географических, погодных и эксплуатационных условиях. Одним из ключевых преимуществ методик является использование технологии получения прецизионных координат опорных точек методом длиннобазисных относительных определений и получения опорных треков динамичного потребителя с использованием метода целочисленного разрешения неоднозначностей фазовых ГНСС-измерений.

**Ключевые слова:** навигационная аппаратура потребителя, ГНСС, навигационные измерения, точностные испытания, опорные треки, метод длиннобазисных относительных измерений

## **PRECISION TESTING TECHNIQUES FOR HIGH-PRECISION NAVIGATION EQUIPMENT OF DYNAMIC CONSUMERS. COMPOSITION AND MAIN CHARACTERISTICS**

### ***Irina A. Anikeeva***

JSC "Roskartography", 45-1, Volgogradskiy Prospect, Moscow, 109316, Russia, Ph. D., Senior Researcher, e-mail: ia.anikeeva@roscartography.ru

### ***Ivan V. Anokhin***

JSC "Russian Space Systems", 53, Aviamotornaya St., Moscow, 111250, Russia, Technician

### ***Vladimir S. Vdovin***

JSC "Russian Space Systems", 53, Aviamotornaya St., Moscow, 111250, Russia, Head of the Sector, e-mail: contact@spacecorp.ru

### ***Vadim F. Ivanov***

JSC "NIIAS", 115 "A", Moscow Ave. St., St. Petersburg, 196006, Russia, Head of the Sector

### ***Alexander P. Karpik***

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Rector, phone: (383)343-39-37, e-mail: rectorat@ssga.ru

### ***Maria S. Kuznetsova***

JSC "Roskartography", 45-1, Volgogradskiy Prospect, Moscow, 109316, Russia, Research Engineer

### ***Anton V. Lavrukhin***

JSC "Roskartography", 45-1, Volgogradskiy Prospect, Moscow, 109316, Russia, Research Engineer

### ***Leonid A. Lipatnikov***

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Leading Engineer, phone: (923)227-89-57, e-mail: lipatnikov\_1@mail.ru

### ***Pavel A. Popov***

JSC "Russian Space Systems", 53, Aviamotornaya St., Moscow, 111250, Russia, Technician

### ***Andrey S. Rublev***

JSC "Russian Space Systems", 53, Aviamotornaya St., Moscow, 111250, Russia, Technician

### ***Vitaly G. Sernov***

JSC "Russian Space Systems", 53, Aviamotornaya St., Moscow, 111250, Russia, Head of the Sector

The article provides a brief overview of the developed by the authors and approved methods of precision testing of various samples of NAP-V dynamic consumers and the main test results using these methods in various geographic, weather and operational conditions. One of the key advantages of the techniques is the use of technology for obtaining precision coordinates of control points by the method of long-baseline relative determinations and obtaining reference tracks of a dynamic consumer using the method of integer resolution of ambiguities of phase GNSS measurements.

**Keywords:** consumer navigation equipment, GNSS, navigation measurements, precision tests, reference tracks, method of long-baseline relative measurements

## *Введение*

Представим классификацию навигационной аппаратуры потребителя глобальной навигационной спутниковой системы (НАП ГНСС) (по точности данная классификация является более обобщенной классификацией ГОСТ 31380–2009 [1]):

– НАП-С – НАП стандартной точности ( $s > 1$  м,  $s$  – средняя квадратическая погрешность, включая случайную и систематическую составляющие (СКП)), основной парк НАП, режим измерений – абсолютный;

– НАП-В – высокоточная НАП ( $1 \text{ м} \geq s > 0,10$  м), основной парк НАП, режим измерений – абсолютный, дифференциальный (т. е. с использованием корректирующей информации (КИ));

– НАП-П – прецизионная НАП ( $0,10 \text{ м} \geq s \geq 0,01$  м), геодезическая аппаратура, режим измерений – абсолютный, относительный.

**Цель исследования** – краткий обзор разработанных авторами методик точностных испытаний различных образцов НАП-В динамичных потребителей и основных результатов испытаний по этим методикам в различных географических, погодных и эксплуатационных условиях, включая условия Крайнего Севера.

География проведения эксперимента (рис. 1):

- Новосибирск;
- Омск;
- Москва;
- Санкт-Петербург;
- Ленинградская область – станция «Лужская-Сортировочная», Ломоносов, Лехтуси;
- Балтийское море – Финский залив;
- Мурманск;
- Мурманская область – Мишуково;
- Баренцево море;
- архипелаг «Земля Франца Иосифа», архипелаг «Новая Земля».

Задачи, решаемые в ходе исследования:

- преобразование координат места из геоцентрической системы координат в геодезическую;
- редукция координат точки измерения к точке наблюдения;

- 3D-моделирование динамичных потребителей с элементами движения и редукации;
- получение прецизионных координат опорных точек;
- получение координат опорных треков с использованием метода разрешения неоднозначностей фазовых ГНСС-измерений;
- получение треков невязок;
- оценка точности с учётом случайной и систематической составляющих погрешности измерений.



Рис. 1. География проводимых испытаний

### *Основы прикладной теории оценки точности навигационных измерений*

Базовые статистические характеристики результатов измерений включают в себя следующие.

1. Среднее значение  $\bar{x}$  –

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n},$$

где  $n$  – число измерений.

2. Суммарная погрешность  $s$  –

$$s = \sqrt{\bar{x}^2 + \sigma^2}.$$

3. Среднеквадратическое отклонение (СКО)  $\sigma$  –

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}.$$

4. Оценка точности  $\bar{x}$   $\sigma_{\bar{x}}$  –

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}.$$

Отбраковка результатов измерений производится по правилу  $3\sigma$ :

$$|x_i - \bar{x}| \leq 3\sigma.$$

Если условие не выполняется,  $x_i$  бракуется

### ***Основы нормативного обеспечения оценки точности навигационных измерений***

Статистическая обработка результатов измерений заключается в следующем:

- исключение систематических погрешностей из результатов измерений;
- вычисление среднего арифметического значения исправленных результатов измерений;
- вычисление СКО результатов измерений;
- отбраковка грубых погрешностей из результатов измерений по критерию  $3\sigma$ ;
- вычисление СКО среднего арифметического значения;
- проверка гипотезы о нормальном законе распределения результатов измерений;
- вычисление доверительных границ случайной погрешности (случайной составляющей погрешности)  $\pm \varepsilon$  результата измерения:

$$\varepsilon = t\sigma_{\bar{x}},$$

где  $t$  – табличный коэффициент Стьюдента, зависящий от доверительной вероятности  $P$ ;

– вычисление границ неисклученных остатков систематической погрешности (НСП) результата измерения;

При равномерном распределении НСП [2] границы  $\pm\theta$  вычисляются по формуле

$$\theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_i^2},$$

где  $\theta_i$  – граница  $i$ -й НСП;

$k$  – коэффициент, определяемый доверительной вероятностью  $P$ ; при  $P = 0,95, k=1,1$ ;

– вычисление доверительных границ погрешности результата измерения  $\Delta$ :

- если  $\frac{\theta}{\sigma_\sigma} < 0,8$ , то НСП по сравнению со случайными пренебрегают:

$$\Delta = \varepsilon,$$

- если  $\frac{\theta}{\sigma_\sigma} > 0,8$ , случайной погрешностью по сравнению с систематической пренебрегают:

$$\Delta = \theta,$$

- если  $\frac{\theta}{\sigma_\sigma} = 0,8$ , оценка суммарного СКО результата измерения вычисляется следующим образом:

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\theta_i^2}{3} + \sigma^2}.$$

Оценка точности навигационных измерений по каждой из осей трехмерного пространства:

1) СКП  $s_{\text{изм}}$  единичного измерения навигационной величины  $x$ :

$$s_{\text{изм}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}};$$

2) СКП  $\sigma_{\bar{x}}$  вероятнейшего (среднего арифметического, среднего весового) значения навигационной величины  $x$ ;

3) частное СКО  $s$ :

$$s = \sqrt{s_{\text{изм}}^2 + s_{\text{испр}}^2},$$

где  $s_{\text{испр}}$  – СКП тех частных поправок исправления и обработки, которые не повторяются при последовательных определениях данного навигационного параметра;

4) повторяющаяся СКП  $s_{\text{повт}}$ :

$$s_{\text{повт}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n s_{0i}^2},$$

где  $s_{0i}$  – СКП общих поправок  $a_{0i}$ , которыми исправляются все значения данного навигационного параметра;

5) полная СКП  $S_{\text{полн}}$ :

$$S_{\text{полн}} = \sqrt{s^2 + s_{\text{повт}}^2}.$$

Оценка точности места потребителя (судна):

- эллиптическая погрешность;
- радиальная погрешность;
- линейная погрешность.

Радиальная погрешность места – это круг с центром в оцениваемом месте радиусом  $R$ , в пределах которого с заданной вероятностью находится фактическое место потребителя (судна):

$$R = \sqrt{a^2 + b^2},$$

где  $a$  и  $b$  – полуоси среднего квадратического эллипса погрешностей, в пределах которого место потребителя (судна) находится с вероятностью:

- от  $P = 0,683$  при  $\frac{b}{a} = 0$ ;
- до  $P = 0,632$  при  $\frac{b}{a} = 1$ .

При  $\frac{b}{a} = 1$  радиальная средняя квадратическая погрешность превращается в круговую. Радиальная предельная погрешность  $\hat{R}$  представляет собой круг, в пределах которого место потребителя (судна) находится с вероятностью  $P \geq 0,95$ .

Погрешность местоопределения – разность измеренного и действительного положения потребителя в рабочей зоне системы с заданным уровнем доступности и надёжности [2].

Алгоритм определения погрешности местоопределения:

– эталонным приёмником выполняются измерения в течение 24 часов, дискретность измерений – 1 секунда только для канала стандартной точности и сигнала в пространстве (без учёта погрешностей распространения в пространстве и погрешностей в приёмнике – SIS);

– вычисление составляющих погрешностей по широте  $\delta_{Bi}$  и долготе  $\delta_{Li}$  (в метрах) на каждый момент времени  $t_i$ ;

– вычисление мгновенной горизонтальной погрешности  $\delta_{Gi}$ :

$$\delta_{Gi} = \sqrt{\delta_{Bi}^2 + \delta_{Li}^2};$$

– вычисление горизонтальной погрешности  $\Delta G$ , соответствующей  $P = 0,95$  и  $P = 0,9999$  испытаний:

$$\Delta_{G95} = M_{95} \text{ при } n = \text{INTEGER}(0,95 \times S_{\text{ACC}});$$

$$\Delta_{G99,99} = M_{99,99} \text{ при } n = \text{INTEGER}(0,9999 \times S_{\text{ACC}}),$$

где  $S_{\text{ACC}}$  – общее число сеансов, дискретностью 1 секунда, действительных для оценки погрешности местоопределения.

Для морских НАП горизонтальная погрешность вычисляется по формуле  $\Delta_{\Gamma 95}$  для  $P=0,95$  и горизонтальном геометрическом факторе HDOP  $\geq 4$ .

Для судовых многосистемных, многоканальных НАП, работающих по сигналам ГНСС ГЛОНАСС/GPS/GALILEO, горизонтальная погрешность вычисляется так же, но для HDOP  $\geq 2$ .

При нормальном законе распределения погрешностей навигационных измерений:

$$\Delta_{\Gamma 95} \approx s_{\Gamma} = \sqrt{s_B^2 + s_L^2},$$

где  $s_B$  и  $s_L$  – СКО по широте и долготе, соответственно.

Погрешность по высоте (вертикали) вычисляется отдельно, но по алгоритму, аналогичному алгоритму для горизонтальной погрешности.

Нормативная база, регулирующая оценку точности измерений различных физических величин в условиях отсутствия необходимых эталонов, – ИСО 5725 [3].

Термин «Правильность» характеризует степень близости результата измерений к истинному или условно истинному (действительному) значению измеряемой величины или, в случае отсутствия эталона измеряемой величины, – степень близости среднего значения, полученного на основании большой серии результатов измерений (или результатов испытаний) к принятому опорному значению.

Показатель – значение систематической погрешности.

Термин «прецизионность» характеризует степень близости друг к другу независимых результатов измерений, полученных в конкретных установленных условиях. Эта характеристика зависит только от случайных факторов и не связана с истинным или условно истинным значением измеряемой величины.

Показатель – СКО результатов измерений, выполненных в определенных условиях

В условиях отсутствия необходимых эталонов используется термин «принятое опорное значение» – общее среднее значение (математическое ожидание) установленной (заданной) совокупности результатов измерений.

### ***Преобразование координат места из геоцентрической системы координат в геодезическую систему координат***

1. Геодезические системы координат: ГСК-2011 (реже устаревшие СК-42, СК-95).

2. Геоцентрические системы координат, описанные в российских нормативных источниках: ПЗ-90.11 и более ранние версии (для ГЛОНАСС), WGS 84(G1934) и более ранние версии (для GPS).

3. Информацию о системах координат ГНСС для мультисистемных НАП (в том числе ITRS/ITRF) можно получить из различных зарубежных источников: международных шаблонов (англ., templates) систем координат, используемых

в ГНСС ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, Beidou, QZSS, опубликованных Международным комитетом по ГНСС (англ., International Committee on GNSS (ICG)): <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/icg/resources/Regl-ref.html>.

4. Отметим, что при преобразовании координат места из любой геоцентрической системы координат в любую геодезическую систему координат необходим учёт эпохи, на которую выведена та или иная геоцентрическая система координат.

Рассмотрим редукцию координат точки измерения к точке наблюдения (на примере морского судна). Определим координаты  $X_0, Y_0, Z_0$  точки наблюдения  $O$  динамического потребителя в общеземной системе координат при наличии измеренных координат точки измерения  $A$  (рис. 2).

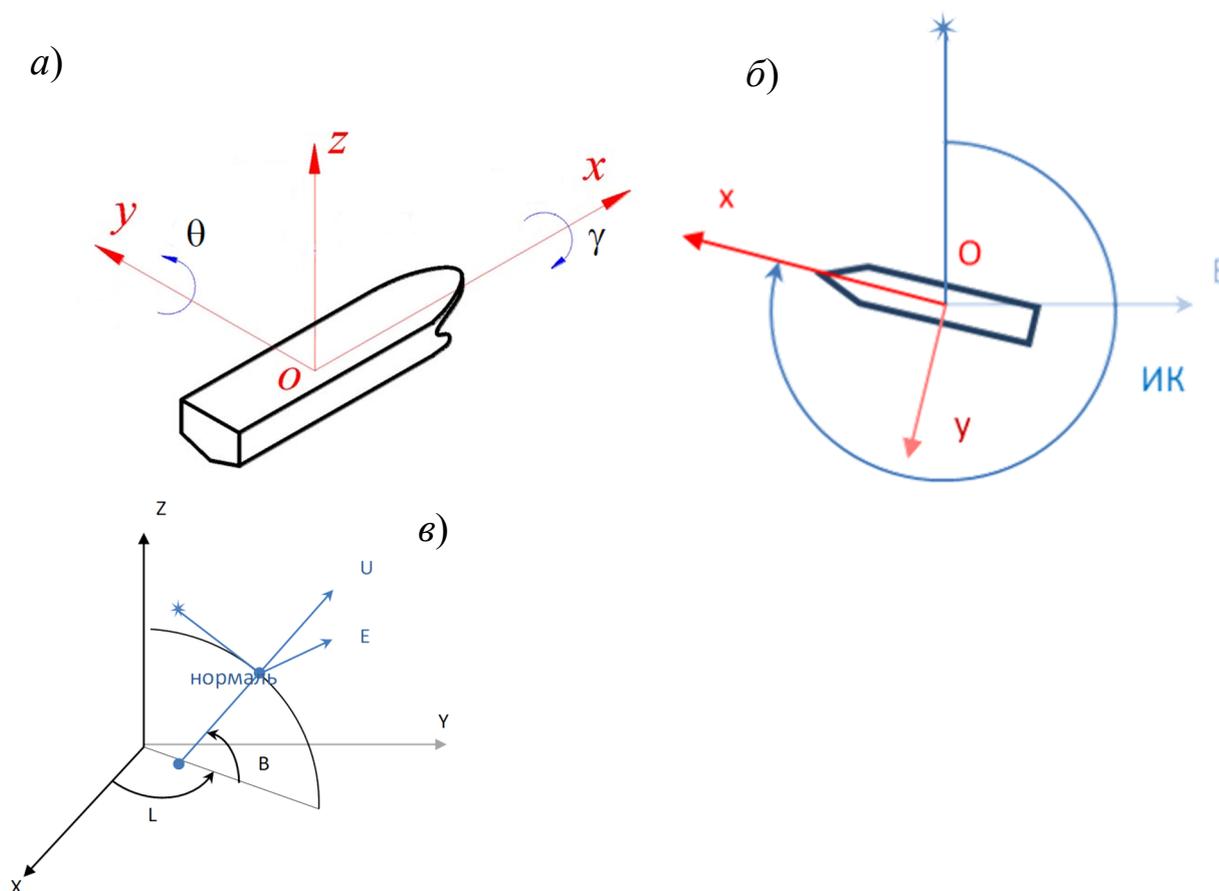


Рис. 2. Определение координат:

а) бортовая и килевая качка; б) истинный курс судна; в) ориентация осей топоцентрической и горизонтальной системы координат в ПЗ-90.11

Исходные данные (на единый момент измерений):

- $X_A, Y_A, Z_A$  – координаты фазового центра антенны НАП в ПЗ-90.11;
- $x, y, z$  – координаты фазового центра антенны НАП в системе координат судна;
- бортовая качка судна (угол поворота вокруг оси судна  $x$ , отсчитываемый от вертикали до диаметральной плоскости судна против часовой стрелки);

- килевая качка судна (угол поворота вокруг оси судна  $y$ , отсчитываемый от вертикали против часовой стрелки до оси  $Z$  судна);
- ИК – мгновенный истинный курс судна (с учетом рыскания).

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_0 = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_A - \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = \mathbb{R} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix};$$

$$\mathbb{R} = \mathbb{R}_3(-\lambda - 90^\circ) \cdot \mathbb{R}_1(\varphi - 90^\circ) \cdot \mathbb{R}_3(\text{ИК} - 90^\circ) \cdot \mathbb{R}_2(-\theta) \cdot \mathbb{R}_1(-\gamma),$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbb{R}_1(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \\ \mathbb{R}_2(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix}, \\ \mathbb{R}_3(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{array} \right.$$

где  $R$  – матрица поворота осей при переходе от СК судна;

$R_1(\alpha)$ ,  $R_2(\alpha)$ ,  $R_3(\alpha)$  – элементарные матрицы поворота осей на некоторый угол;

$\varphi$ ,  $\lambda$  – астрономические координаты: широта и долгота – могут быть вследствие малости уклонения отвесных линий заменены на геодезические координаты  $B$ ,  $L$ , которые могут быть вычислены по формулам

$$L = \begin{cases} \text{arctg}(Y / X), X \geq 0 & ; \\ \text{arctg}(Y / X) + \pi, X < 0 \end{cases}$$

$$B_j = \text{arctg} \left( \frac{Z + N_{j-1} \cdot e^2 \cdot \sin B_{j-1}}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right);$$

$$N_j = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 B_{j-1}}},$$

где  $B_j$  – значение геодезической широты на  $j$ -й итерации;

$L$  – геодезическая долгота;

$N_j$  – значение радиуса кривизны эллипсоида в первом вертикале на  $j$ -й итерации;

$a$  – большая полуось общеземного эллипсоида;

$e$  – эксцентриситет общеземного эллипсоида.

Приведенные формулы соответствуют последовательному преобразованию координат из СК судна ( $x, y, z$ ) в топоцентрическую горизонтальную систему координат ( $E, N, U$ ), а затем в геоцентрическую земную систему координат ПЗ-90.11 ( $X, Y, Z$ ).

Рассмотрим 3D-моделирование динамичных потребителей с элементами движения и редукции (на примере морского судна и автомобиля). 3D-моделирование – процесс формирования трёхмерного изображения виртуальной модели объекта, позволяющий с максимальной точностью продемонстрировать размер, форму, внешний вид объекта и другие его характеристики.

На рис. 3 приведено 3D-изображение морского судна типа «Эльбрус», оснащённого НАП-В АО «РКС» с элементами движения и редукции. На рис. 4, 5 приведены 3D-изображение автомобиля с элементами редукции во время геодезического контроля точности измерений и схема редукции антенны.

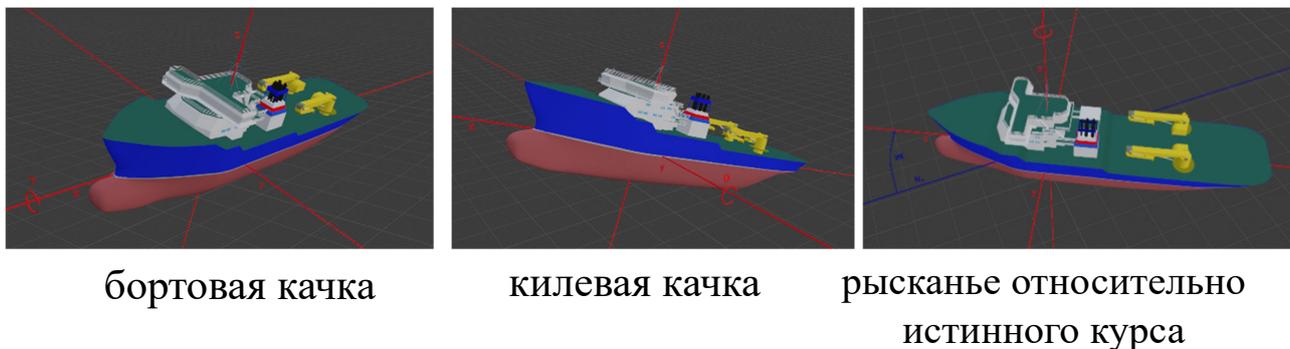


Рис. 3. 3D-изображение морского судна



Рис. 4. Общий вид взаимного расположения автомобиля с антенной НАП-В и геодезического пилона во время геодезического контроля точности измерений



Рис. 5. Схема редукции антенны НАП-В к центру геодезического пилона

### ***Получение прецизионных координат опорных точек***

Получение прецизионных координат фазового центра антенны выполнялось на временном геодезическом пункте на острове «Земля Александры».

Впервые в отечественной практике высокоточная опорная точка получена методом длиннобазисных относительных измерений на северной широте порядка  $80^\circ$ .

СПО обработки – Bernese GNSS Software, Version 5.2.

На рис. 6 показана схема векторов для определения координат временного геодезического пункта на острове «Земля Александры», на рис. 7 – процесс получения прецизионных координат опорных точек.

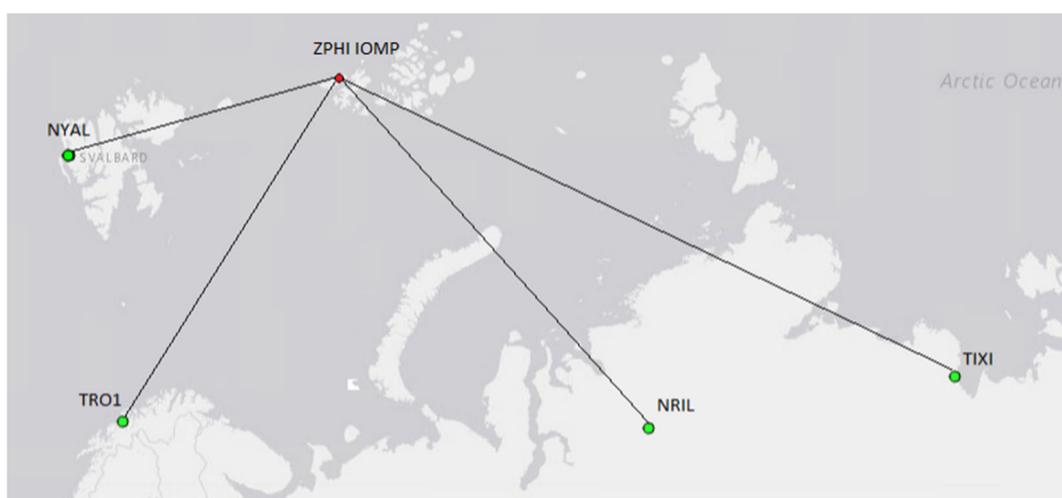


Рис. 6. Схема векторов

		Информация об опорных станциях				
Длины базисов:		Название	NRIL	NYAL	TIXI	TRO1
ZPHI-NRIL = 1624037 м		Приемник	ASHTECH UZ-12	TRIMBLE NETR9	JPS EGGDT	TRIMBLE NETR9
ZPHI -NYAL = 717445 м		Антенна	ASH701945B_M SCIT	AOAD/M_B DOME	TPSCR3_GGD NONE	TRM59800.00 SCIS
ZPHI -TIXI = 2118064 м		Информация об определяемых пунктах				
ZPHI -TRO1 = 1412906 м		Название	ZPHI		IOMP	
IOMP-NRIL = 1624036 м		Приемник	SEPT POLARX5		SEPT POLARX5	
IOMP -NYAL = 717446 м		Антенна	JAV GRANT – G3T	NONE	JAV GRANT – G3T	NONE
IOMP -TIXI = 2118062 м		Итоговые координаты				
IOMP -TRO1 = 1412908 м		в системе отсчёта ITRF – 2014 на текущую эпоху				
		Решение	ZPHI	IOMP		
		X, м	XXXXX0.85646	XXXXX0.86317		
		Y, м	XXXXX4.67708	XXXXX4.68357		
		Z, м	XXXXX1.35165	XXXXX1.40374		
		Широта, 0	XX.7987602	XX.7987602		
		Долгота, 0	XX.5655410	XX.5655409		
		Высота, м	XX.75346	XX.80637		
		в системе координат ПЗ-90.11 на текущую эпоху				
		Решение	ZPHI	IOMP		
		X, м	XXXXX0.85898	XXXXX0.86569		
		Y, м	XXXXX4.68013	XXXXX4.68662		
		Z, м	XXXXX1.35526	XXXXX1.40735		

Рис. 7. Получение прецизионных координат опорных точек

**Получение опорных треков с использованием метода разрешения неоднозначностей фазовых ГНСС-измерений (испытания на железнодорожном транспорте)**

Способы получения высокоточных (опорных) координат динамического потребителя:

1) по результатам постобработки навигационных данных НАП-В в кинематическом относительном режиме (пост-RTK);

2) с помощью опорной НАП динамического потребителя.

Базовые станции, обеспечивающие режим RTK:

- специально установленная на время испытаний БС;
- ближайшие БС различных собственников.

Система координат динамического потребителя: ITRF2008 (WGS-84 G1762) на текущую эпоху.

Состав сохраняемой навигационной информации:

- координаты;
- тип решения (автономное, дифференциальное, плавающее или фиксированное);
- СКО по трём координатам;
- скорость и азимут движения;
- ориентация продольной оси динамического потребителя (движущейся базы для RTK moving base);

Рис. 8 иллюстрирует процесс получения опорных треков.

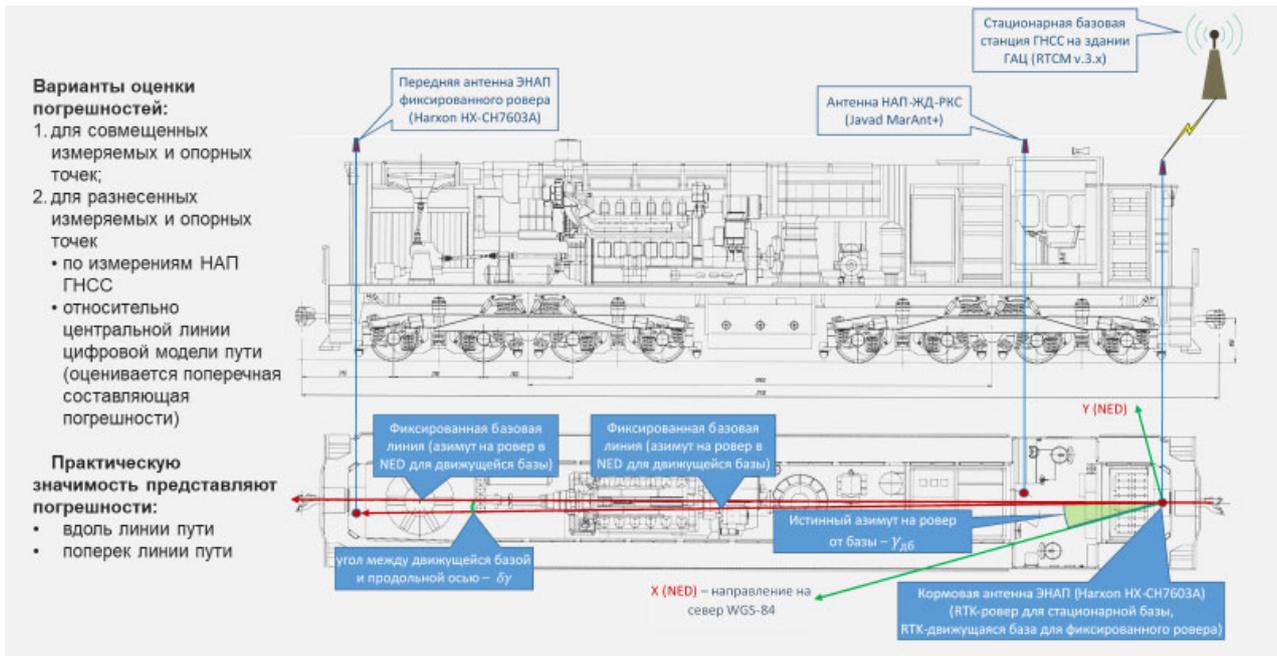


Рис. 8. Получение треков невязок (испытания на железнодорожном транспорте)

Погрешности координат:

$$\Delta_B = B_{i, \text{изм.}} - B_{i, \text{оп.}}$$

$$\Delta_L = L_{i, \text{изм.}} - L_{i, \text{оп.}}$$

$$\Delta_H = H_{i, \text{изм.}} - H_{i, \text{оп.}}$$

Разности геодезических широт и долгот, выраженные в угловых секундах, пересчитываются в метрические разности:

$$\Delta_B = \frac{(B_{i, \text{изм.}} - B_{i, \text{оп.}}) \cdot (M + H)}{\rho''};$$

$$\Delta_L = \frac{(L_{i, \text{изм.}} - L_{i, \text{оп.}}) \cdot (N + H) \cdot \cos B_{i, \text{э.т.}}}{\rho''};$$

$$\Delta_{\text{пл.}} = \sqrt{\Delta_B^2 + \Delta_L^2},$$

где  $M$  – радиус кривизны эллипсоида в меридиане;  
 $H$  – геодезическая высота над эллипсоидом;  
 $N$  – радиус кривизны эллипсоида в первом вертикале;  
 $\rho$  – число угловых секунд в радиане.

Полный вектор погрешности относительно оси пути по продольной и поперечной координате динамического потребителя

$$\begin{bmatrix} \Delta_{X,i} \\ \Delta_{Y,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_i & \sin \gamma_i \\ -\sin \gamma_i & \cos \gamma_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_{B,i} \\ \Delta_{L,i} \end{bmatrix},$$

где  $\Delta_X, \Delta_Y$  – продольная и поперечная погрешности;

$\gamma$  – угол поворота продольной оси НАП относительно направления на истинный север (определяется НАП динамического потребителя в режиме RTK-moving base)

$$\gamma_i = \gamma_{дб,i} + \delta\gamma_i,$$

где  $\gamma_{дб}$  – угол поворота движущейся базы относительно направления на истинный север;

$\delta\gamma$  – угол между движущейся базой и продольной осью динамического потребителя.

### **Получение треков невязок (испытания на железнодорожном транспорте)**

При обработке результатов испытаний, в которых координаты двух испытуемых комплектов НАП динамического потребителя относятся к разным антеннам, погрешности представляют смещенные оценки реальных погрешностей.

Компенсация смещенности оценок – вектор коррекции погрешности:

$$\begin{bmatrix} \beta_{B,i} \\ \beta_{L,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_i & -\sin \gamma_i \\ \sin \gamma_i & \cos \gamma_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_{X,i} \\ \beta_{Y,i} \end{bmatrix},$$

где  $\beta_B, \beta_L$  – коррекция по широте и долготе;

$\beta_X, \beta_Y$  – координаты первой антенны относительно второй антенны НАП динамического потребителя в его системе координат.

Коррекция смещения:

$$\begin{bmatrix} \Delta'_{B,i} \\ \Delta'_{L,i} \\ \Delta'_{H,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta_{B,i} \\ \Delta_{L,i} \\ \Delta_{H,i} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \beta_{B,i} \\ \beta_{L,i} \\ \beta_{H,i} \end{bmatrix},$$

где  $\beta_H$  – коррекция по высоте.

**Оценка точности с учётом случайной и систематической составляющих погрешности измерений:**

1. Обработка каждой серии измерений.
2. Определение сеансных СКО  $\sigma_{\Delta B}, \sigma_{\Delta L}, \sigma_{\Delta X}, \sigma_{\Delta Y}, \sigma_{\Delta H}$ :

$$\sigma_{\Delta B} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta_{B,i}^2}{n}},$$

$$\sigma_{\Delta L} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta_{L,i}^2}{n}},$$

$$\sigma_{\Delta X} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta_{X,i}^2}{n}},$$

$$\sigma_{\Delta Y} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta_{Y,i}^2}{n}},$$

$$\sigma_{\Delta H} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta_{Hi}^2}{n}},$$

где  $n$  – количество измерений в серии измерений

3. Сеансное СКО определения планового положения НАП:

$$\sigma_{\Delta_{гор}} = \sqrt{\sigma_{\Delta B}^2 + \sigma_{\Delta L}^2}.$$

4. СКО определения координат в трехмерном пространстве:

$$\sigma[\Delta_{3D}] = \sqrt{\sigma[\Delta_{пл.}]^2 + \sigma[\Delta_H]^2}.$$

5. Систематические (средние) составляющие погрешности:

$$\overline{\Delta_B} = \sum_{i=1}^n \Delta_B / n;$$

$$\overline{\Delta_L} = \sum_{i=1}^n \Delta_L / n;$$

$$\overline{\Delta_H} = \sum_{i=1}^n \Delta_H / n;$$

$$\overline{\Delta_{пл.}} = \sqrt{\overline{\Delta_B}^2 + \overline{\Delta_L}^2};$$

$$\overline{\Delta_{3D}} = \sqrt{\overline{\Delta_B}^2 + \overline{\Delta_L}^2 + \overline{\Delta_H}^2}.$$

6. СКО случайных составляющих погрешностей (относительно средних значений):

$$\sigma[\overset{\circ}{\Delta_B}] = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta_B - \overline{\Delta_B})^2 / (n - 1)};$$

$$\sigma[\overset{\circ}{\Delta_L}] = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta_L - \overline{\Delta_L})^2 / (n - 1)};$$

$$\sigma[\overset{\circ}{\Delta_H}] = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta_H - \overline{\Delta_H})^2 / (n - 1)};$$

$$\sigma[\overset{\circ}{\Delta_{пл.}}] = \sqrt{\sigma[\overset{\circ}{\Delta_L}]^2 + \sigma[\overset{\circ}{\Delta_B}]^2};$$

$$\sigma[\overset{\circ}{\Delta_{3D}}] = \sqrt{\sigma[\overset{\circ}{\Delta_L}]^2 + \sigma[\overset{\circ}{\Delta_B}]^2 + \sigma[\overset{\circ}{\Delta_H}]^2}.$$

7. Определяется эмпирическое распределение и вычисляется 95-процентный доверительный интервал  $\Delta_{гор}(0,95)$ .

8. Статистики вычисляются по всем сеансам проведенных испытаний.

### ***Заключение***

1. Разработанные методики точностных испытаний высокоточной НАП динамичных потребителей представляют собой комплекс взаимосвязанных науко-

ёмких процедур, позволяющих провести полный комплекс точностных испытаний высокоточной НАП и надёжно определить её точностные характеристики на уровне методических погрешностей порядка 1 см.

2. Одним из ключевых преимуществ методик является использование технологии получения прецизионных координат опорных точек методом длиннобазисных относительных определений и получения опорных треков динамического потребителя (АО «РКС», патент) с использованием метода целочисленного разрешения неоднозначностей фазовых ГНСС-измерений.

3. Методики прошли апробацию в различных географических, погодных и эксплуатационных условиях, включая суровые условия Восточной Сибири и Крайнего Севера.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 31380–2009. Глобальные навигационные спутниковые системы. Аппаратура потребителей. Классификация. – М : Стандартинформ, 2012 – 9 с.

2. ГОСТ 32454–2013. Глобальная навигационная спутниковая система. Параметры радионавигационного поля. Технические требования и методы испытаний. – М. : Стандартинформ, 2014. – 16 с.

3. ГОСТ Р ИСО 5725-1–2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения. – М. : Стандартинформ, 2006. – 24 с.

4. Вдовин В. С., Дворкин В. В., Карпик А. П., Липатников Л. А., Сорокин С. Д., Стеблов Г. М. Проблемы и перспективы развития активных спутниковых геодезических сетей в России и их интеграции в ITRF// Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 6–27.

5. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11). Справочный документ [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа : <http://structure.mil.ru/files/pz-90.pdf>.

6. EFT. Базовые станции на территории РФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://eft-cors.ru/>.

© *И. А. Аникеева, И. В. Анохин, В. С. Вдовин, В. Ф. Иванов, А. П. Карпик, М. С. Кузнецова, А. В. Лаврухин, Л. А. Липатников, П. А. Попов, А. С. Рублёв, 2021*