

К. В. Бондаренко¹✉

Анализ патентных решений и зарубежных разработок в области гиперспектральных систем для дистанционного зондирования

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: banderars001@gmail.com

Аннотация. В статье представлен углубленный технический анализ пяти патентных документов (четырёх российских и одного международного) и двух зарубежных публикаций, посвящённых гиперспектральным приборам, их применение, возможные технические решения. Для каждого патента рассмотрены: решаемая проблема, конструктивные особенности, оптическая схема, режимы работы, приведенные формулы, а также указаны ограничения и возможные пути их преодоления. На основе выполненного анализа предложена концепция гибридной гиперспектральной камеры, объединяющей цифровое накопление (TDI), вогнутую решетку с переменным шагом и элементы сжатого зондирования для дистанционного зондирования и разведки, для исследования и обнаружения различных спектральных диапазонов. Отдельное внимание уделено адаптации рассмотренных технических решений к климатическим условиям Российской Федерации.

Ключевые слова: гиперспектральная камера, патент RU 2624622, патент RU 2653772, патент RU 230837, патент RU 2635841, сжатое зондирование, интерферометр Фабри–Перо, VLS-решетка, цифровой TDI, линейный переменный фильтр

К. В. Bondarenko¹✉

Analysis of Patent Solutions and Foreign Developments in the Field of Hyperspectral Systems for Remote Sensing

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: banderars001@gmail.com

Abstract. The article presents an in-depth technical analysis of five patent documents (four Russian and one international) and two foreign publications devoted to hyperspectral instruments, their applications, and possible technical solutions. For each patent, the problem to be solved, design features, optical scheme, operating modes, provided formulas, as well as limitations and possible ways to overcome them are considered. Schematic technology applications and device designs are also provided. Based on the performed analysis, a concept of a hybrid hyperspectral camera is proposed, combining digital time delay integration (TDI), a concave variable line-space (VLS) grating, and compressed sensing elements for remote sensing and reconnaissance, for the study and detection of various spectral ranges. Special attention is paid to the adaptation of the considered technical solutions to the climatic conditions of the Russian Federation.

Keywords: hyperspectral camera, patent RU 2624622, patent RU 2653772, patent RU 230837, patent RU 2635841, compressed sensing, Fabry–Perot interferometer, VLS grating, digital TDI, linear variable filter

Введение

Развитие гиперспектральной аппаратуры для дистанционного зондирования Земли в настоящее время характеризуется интенсивным поиском новых конструктивных подходов, позволяющих одновременно улучшить пространственное и спектральное разрешение, повысить отношение сигнал/шум и снизить массогабаритные характеристики приборов. Наиболее радикальные инженерные идеи часто находят отражение в патентной литературе, тогда как апробация серийных технологий описывается в профильных научных журналах, таких как *Sensors* и *Optics Express*. Комплексное сопоставление сведений из этих источников дает возможность выявить перспективные направления для дальнейших разработок.

В рамках данной работы выполнен детальный разбор пяти патентных решений и двух экспериментальных систем. Для каждого объекта анализа приведено описание устройства, принципа действия, заявленных преимуществ и скрытых недостатков. В заключительной части сформулирована концепция гибридной гиперспектральной камеры, ориентированной на эксплуатацию в широком диапазоне температур (от -40 до $+50$ °С), характерном для регионов Сибири и Арктики.

Патент RU 2624622: многощелевая камера с ВЗН и жидкокристаллической щелевой структурой

В традиционных гиперспектральных камерах типа pushbroom с одной входной щелью время накопления сигнала ограничено скоростью движения носителя. С увеличением требуемого пространственного разрешения экспозиция сокращается, что приводит к падению отношения сигнал/шум. Авторы патента [1] предлагают компенсировать этот эффект за счет двух решений: использования многощелевой структуры и перевода фотоприемника в режим временной задержки и накопления (ВЗН).

Оптическая схема (рис. 1а, 1б) включает входной объектив (поз. 1), строящий изображение местности на щелевой структуре. Щелевая структура выполнена не механически, а в виде жидкокристаллического (ЖК) дисплея либо матрицы микрозеркал (DMD). Управляющий контроллер формирует на дисплее несколько параллельных щелей, ширина и межщелевое расстояние которых задаются программно.

Далее свет последовательно проходит коллимационный объектив (поз. 3), диспергирующий элемент – призму прямого зрения Амичи (поз. 4) и выходной объектив (поз. 5). Фотоприемное устройство (поз. 6) представляет собой строчно-кадровую ПЗС-матрицу, функционирующую в режиме ВЗН: зарядовые пакеты переносятся синхронно со смещением изображения, обеспечивая накопление сигнала на нескольких строках одновременно.

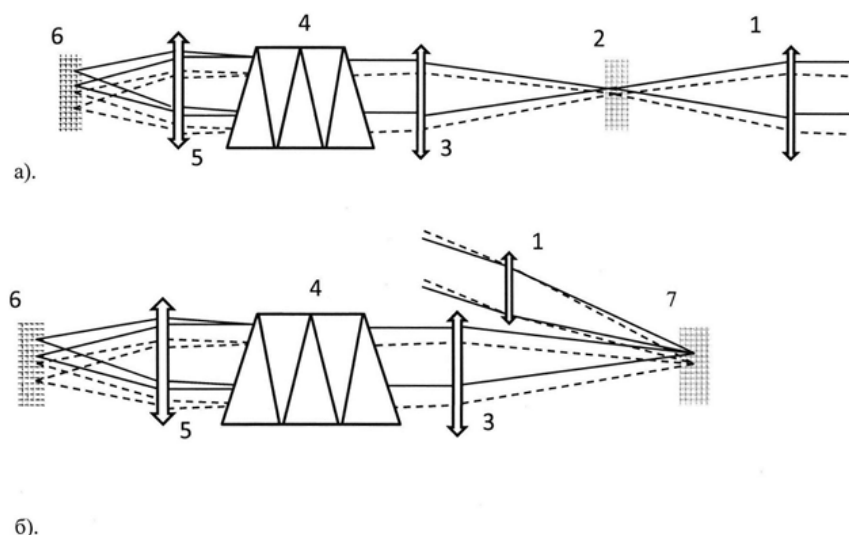


Рис. 1. Оптическая схема

Контроллер синхронизирует два процесса. Во-первых, тактовые сигналы ПЗС-матрицы согласуются со скоростью движения изображения: время переноса заряда на одну строку равно времени пролета изображения на один пиксель. Во-вторых, положение каждой щели на ЖК-дисплее динамически изменяется, следуя за движением изображения.

В патенте [1] описан трехуровневый алгоритм управления: внешний цикл по номеру сканирования, средний – по номеру линейного участка в пределах области одной щели, внутренний – по шагу сопровождения участка. Частота синхроимпульсов рассчитывается исходя из высоты и скорости носителя, а также требуемого пространственного разрешения вдоль направления полета.

Показано повышение чувствительности без потери пространственного разрешения. Эффективное время накопления возрастает пропорционально числу щелей. Например, при четырех щелях более удачное решение в отношении сигнал/шум (при доминировании фотонного шума) составляет около двух. Отказ от механического поворотного зеркала, использованного в прототипе [5], исключает вибрации и искажения изображения.

Несмотря на очевидные достоинства, предложенное решение сопряжено с энергетическими потерями. ЖК-дисплей даже в прозрачном состоянии характеризуется коэффициентом пропускания не более 30–40 % для поляризованного света. Если дисплей установлен перед объективом, указанные потери могут устранить преимущества от многощелевого режима. Вероятно, авторы подразумевали работу ЖК-ячейки на отражение (по аналогии с LCoS), однако в тексте патента этот момент детально не раскрыт. Применение DMD также не обеспечивает 100 % дифракционной эффективности. Тем не менее для задач, где приоритетом является равномерность покрытия, а не предельная светосила, подобная архитектура сохраняет практическую значимость.

Патент RU 2653772: сжатое зондирование с нерегулярной дифракционной решеткой

Патент [2], переданный в Российскую Федерацию по процедуре РСТ, базируется на теории сжатого зондирования (compressed sensing). В отличие от классической гиперспектральной съемки, порождающей трехмерный массив данных (x, y, λ) , здесь предполагается восстановление информации из существенно меньшего числа измерений благодаря разреженности сигнала в некотором базисе.

Система содержит принимающую оптику (телескоп, фотоаппарат или микроскоп в зависимости от решаемой задачи), светоделительный блок (дихроичные зеркала либо полосовые фильтры) и несколько параллельных каналов. В каждом канале последовательно размещены система переноса выходного зрачка, нерегулярная дифракционная решетка и фотоприемная система (линза увеличения с ПЗС-матрицей).

Ключевым элементом служит нерегулярная дифракционная решетка – структура с псевдослучайным фазовым профилем. Она одновременно выполняет две функции: рассеивает падающее излучение в спектр-картину (фазовая модуляция) и диспергирует свет по длинам волн. В результате каждый узкополосный точечный источник формирует на фотоприемнике уникальное спектр-поле, слабо коррелированное с полями от других источников.

Восстановление сигнала сводится к решению задачи нелинейной оптимизации. Матрица Φ определяется экспериментально в ходе калибровки: для каждого положения (x, y) и каждой длины волны λ регистрируется соответствующая спектр-картина.

Объем регистрируемых данных сокращается в 5–10 раз по сравнению с полным сканированием. Благодаря использованию фазовой модуляции (в отличие от амплитудной, характерной для однопиксельных камер с DMD) потери энергии сведены к минимуму. Система может работать в широком спектральном диапазоне – от ультрафиолетового до дальнего инфракрасного – путем выбора материала решетки (кварц, германий и т.д.).

Обработка сигнала требует решения сложной задачи, что на борту носителя (спутника или БПЛА) сопряжено с высокими вычислительными затратами. Предполагается, что основная обработка будет выполняться на наземных станциях. Однако передача сжатых данных по узкополосным каналам связи остается проблемой, особенно актуальной для удаленных территорий. Дополнительную сложность представляет технология изготовления нерегулярных решеток с высокой воспроизводимостью: в патенте не приведено конкретных сведений о производственном процессе.

Патент RU 230837 U1: телевизионное гиперспектральное устройство с компенсацией мод интерферометра Фабри–Перо

Интерферометр Фабри–Перо (ФПИ) состоит из двух полупрозрачных зеркал с регулируемым зазором. Изменение зазора смещает максимум пропускания, однако наряду с основной модой возникают побочные порядки интерференции.

При широкополосном освещении детектор регистрирует сумму сигналов от основной и дополнительных мод, что искажает спектр.

Структурная схема (рис. 2) включает объектив (1), ФПИ (2), монохромную телевизионную камеру на ПЗС-матрице (3), микроконтроллер (4) с цифро-аналоговым преобразователем для управления ФПИ и блок памяти (5). Новым элементом по сравнению с прототипом (патент US 10323985) является блок вычитания (6).

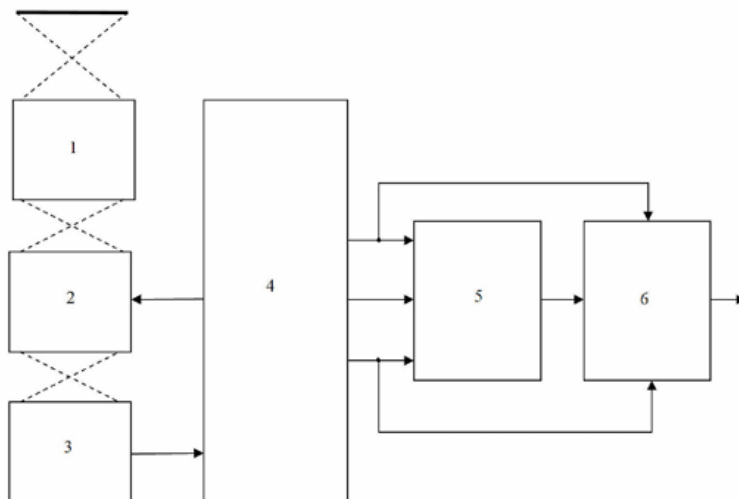


Рис. 2. Структурная схема

Блок памяти реализован в виде цепочки ОЗУ, в которой каждый кадр последовательно сдвигается. Число ячеек памяти соответствует числу узких спектральных зон регистрации.

Сначала микроконтроллер формирует n приращений напряжения, изменяя воздушный зазор. На этом этапе регистрируются изображения только от первой моды (паразитные порядки отсутствуют из-за малой величины зазора). Полученные кадры сохраняются в памяти.

Затем микроконтроллер переключает коммутатор и генерирует n приращений. При увеличенном зазоре возникает вторая мода, и детектор фиксирует суммарный сигнал (первая + вторая моды). Одновременно активируется блок вычитания: на его первый вход поступает текущий суммарный кадр, на второй – ранее сохраненный кадр первой моды. Результатом вычитания становится изображение, соответствующее исключительно второй моде. Процедура повторяется для всех шагов сканирования, обеспечивая разделение мод.

Авторы провели численное моделирование в среде MATLAB для диапазона 0,4–0,7 мкм с шагом по зазору 0,01 мкм, используя формулу Эйри. На рис. 3 исходного патента показаны спектральные характеристики, а также разностный сигнал. Видно, что после вычитания остается только узкий пик второй моды.

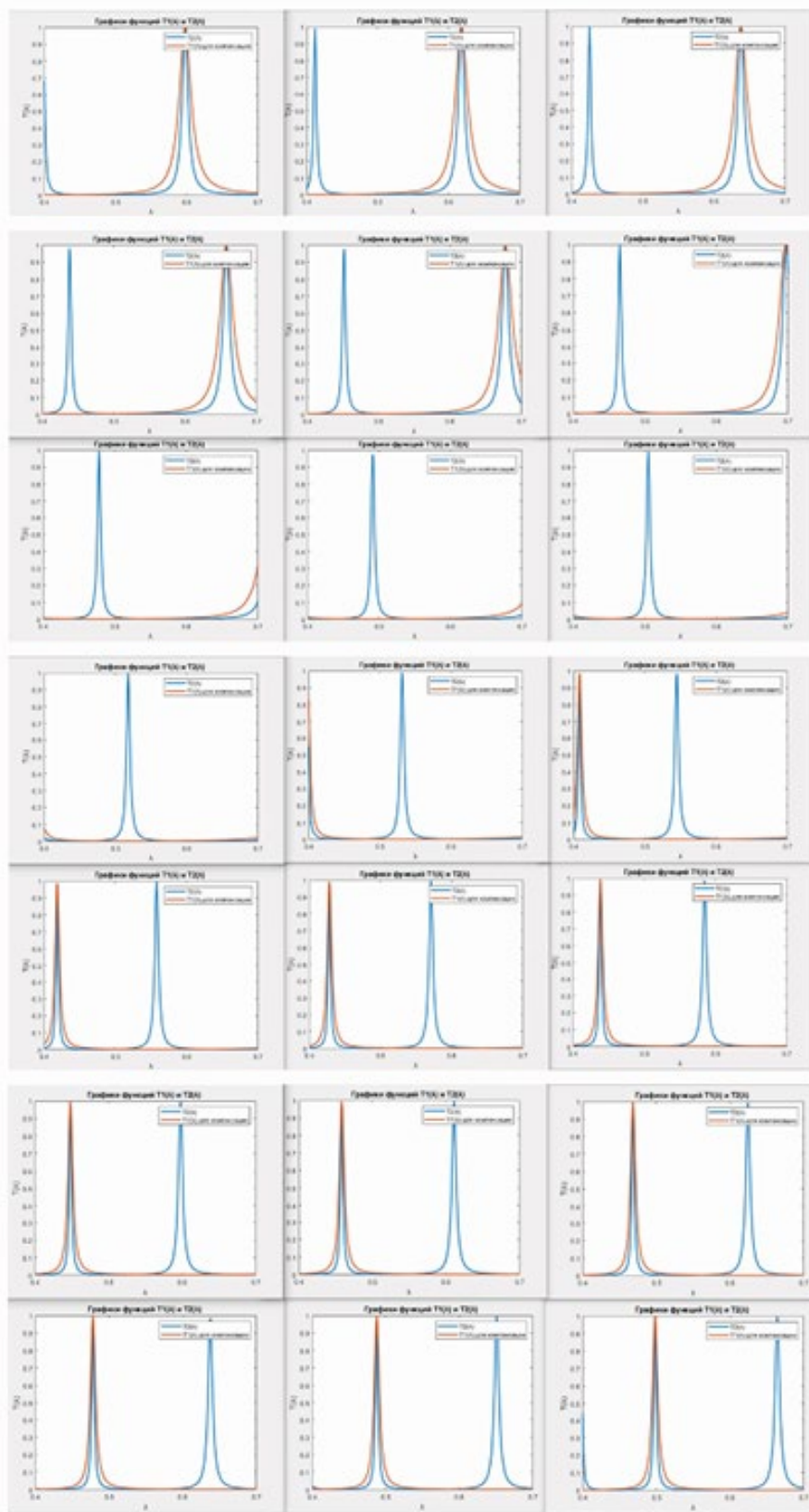


Рис. 3. Исследования в программе

К достоинствам следует отнести простоту элементной базы (стандартные микроконтроллеры, серийные ПЗС-камеры) и отсутствие сложной оптики. Недо-

статком является двукратное увеличение времени сканирования: сначала кадров для первой моды, затем n кадров для вычитания. При количестве спектральных каналов порядка ста общее число экспозиций достигает двухсот, что делает метод малоприменимым для съемки динамичных сцен с подвижных платформ.

Патент RU 2635841: гиперспектральный 2D-спектрофотометр на основе анастигмата

В данном устройстве [4] отсутствуют как щель, так и традиционная дифракционная решетка. Спектроделитель выполнен в виде двухзеркального матричного анастигмата – двух ортогонально скрещенных четверть-цилиндрических отражателей (рис. 4). Авторы (Мельников Г.С. и Самков В.М, ГОИ им. Вавилова) развивают подходы фрактальной оптики.

Параллельный световой поток от объекта падает на первый четверть-цилиндрический отражатель (поз. 8), который фокусирует излучение в линию. Второй отражатель (поз. 9), ортогональный первому, осуществляет фокусировку в перпендикулярном направлении. В результате на выходе формируется двумерный массив изображений, где одна координата соответствует пространственной информации, а другая – спектральной (за счет дисперсии, обусловленной цилиндрической геометрией).

Отражатели могут быть зеркальными либо диэлектрическими (кварц для УФ-видимого диапазона, германий для ИК). По утверждению авторов, при использовании фрактальных элементов с коэффициентом фрактальности достижимо относительное спектральное разрешение $\Delta\lambda/\lambda$ порядка 10^{-3} – 10^{-4} , что в видимой области соответствует 0,1–1 нм.

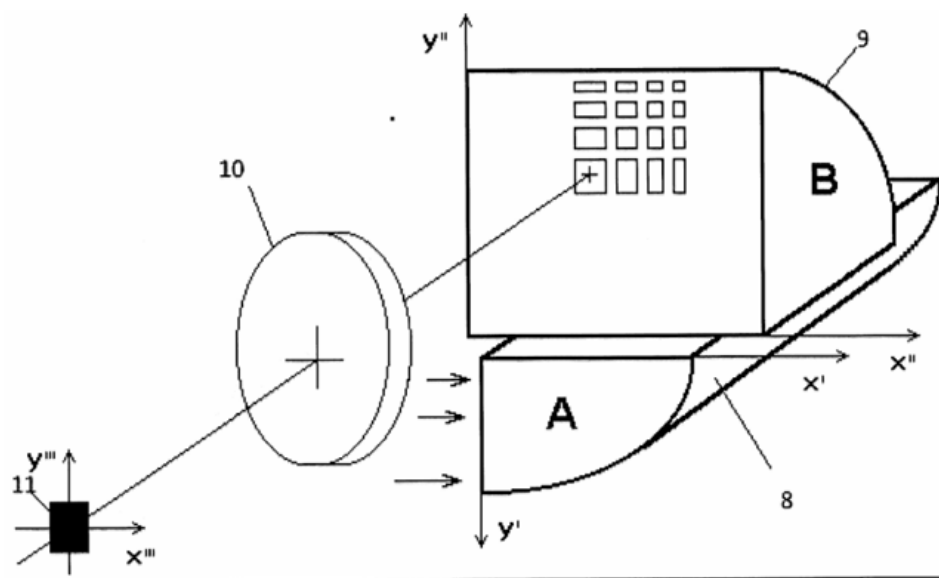


Рис. 4. Спектроделитель

Отсутствие движущихся частей и щелевого сканирования позволяет регистрировать гиперспектральный куб за одну экспозицию (режим snapshot). Зер-

кальная схема свободна от хроматических aberrаций, что особенно важно при работе в широком спектральном диапазоне.

Изготовление двух ортогональных цилиндрических отражателей с требуемой точностью представляет собой нетривиальную технологическую задачу. Конкретные методы изготовления в патенте не раскрыты. Кроме того, отсутствуют данные о величине поля зрения и требованиях к фотоприемнику, который должен обладать большим числом пикселей для регистрации матрицы спектральных каналов.

Зарубежные разработки: цифровой TDI и VLS-решетки

В работе [6] исследователи из Чанчуньского института оптики и точной механики применили линейный переменный фильтр (LVF), наклеенный непосредственно на КМОП-матрицу. Фильтр обеспечивает плавное изменение центральной длины волны вдоль строк матрицы. При движении спутника один и тот же участок местности последовательно экспонируется под разными строками, после чего сигналы с нескольких строк, соответствующих одному пикселю местности, суммируются (цифровой TDI). Использование детектора GSENSE5130 с частотой кадров до 1550 fps (при выборе 256 активных строк) позволило реализовать TDI уровня 8. Выигрыш в SNR составил около 2,8 раза, при этом влияние на спектральное разрешение не превысило 0,4 нм.

Авторы [7] изготовили вогнутую решетку с переменным расстоянием между штрихами (VLS).

Такая решетка корректирует астигматизм и обеспечивает фокусировку спектра на плоскую линию, что позволяет использовать стандартный линейный фотоприемник (Sony ILX511, 2048 пикселей).

Изготовление решетки осуществлялось методом вакуумного наноимпринтинга через эластичный штамп из ПДМС. Плоский мастер с 600 штр/мм размножался в ПДМС, затем штамп неравномерно растягивался и прижимался к вогнутой подложке с УФ-отверждаемым полимером. После металлизации алюминием получена решетка с измеренной эффективностью 43 % (выше, чем у типичных голографических решеток). Спектральное разрешение составило 1,46 нм при ширине щели 10 мкм. Габариты спектрометра – 11×11×3 см³, масса около 230 г.

Таблица 1 – Сравнительная таблица рассмотренных решений

Патент	RU 2624622	RU 2653772	RU 2635841	Fan 2021	Chen 2017
Тип прибора	Pushbroom + TDI	Сжатое зондирование		Pushbroom + LVF + TDI	Спектрометр с VLS-решеткой
Спектральный диапазон нм	400–1000	УФ-ИК	УФ-ИК	450–950	360–825
Спектральное разрешение	Не указано	Не указано	0.1–1 нм	10,2 нм	1,46 нм

Окончание табл. 1

Патент	RU 2624622	RU 2653772	RU 2635841	Fan 2021	Chen 2017
Пространственное разрешение	Высокое	Высокое	Высокое	10 м	10 мкм
Масса	3,2 кг	Не указана	Не указана	Легкая	230 г
Сложность изготовления	Средняя	Высокая	Высокая	Низкая	Средняя

Концепция гибридной камеры для условий России

Проведенный анализ показывает, что ни одно из рассмотренных решений не является универсально оптимальным для эксплуатации в климатических условиях Российской Федерации. Вместе с тем синтез нескольких подходов представляется перспективным.

В качестве базового диспергирующего элемента целесообразно использовать вогнутую VLS-решетку [7], обеспечивающую спектральное разрешение 1–2 нм при малых габаритах и массе. Для повышения отношения сигнал/шум при высоком пространственном разрешении предлагается внедрить цифровой TDI [6] в классической pushbroom-схеме, что потребует детектора с частотой кадров не менее 1000 fps.

Расширение спектрального диапазона в коротковолновую ИК-область (SWIR, до 1600–2500 нм) может быть реализовано путем добавления второго канала с дихроичным светоделителем и отдельной VLS-решеткой, аналогично патенту [2], но без применения сжатого зондирования. Альтернативный вариант – использование единого детектора на InGaAs, однако при этом придется пожертвовать видимым диапазоном.

Алгоритм компенсации мод интерферометра Фабри–Перо [3] для системы с решеткой представляется избыточным, однако при необходимости регистрации сверхузких спектральных линий он может быть реализован программно.

С учетом эксплуатации в широком интервале температур (–40...+50 °С) все оптические элементы должны размещаться в герметичном корпусе из материала с низким температурным коэффициентом линейного расширения (инвар, титан). Детектор следует термостабилизировать с помощью элемента Пельтье; при температурах ниже –40 °С может потребоваться подогрев корпуса, что несколько увеличит энергопотребление, но допустимо для кратковременных полетов БПЛА.

Заключение

Выполненный технический анализ пяти патентных документов и двух научных публикаций демонстрирует наличие нескольких конкурирующих подходов

к построению гиперспектральных систем. Наиболее перспективными для дальнейшего развития признаны:

- вогнутые решетки с переменным шагом (VLS) – благодаря высокому спектральному разрешению и компактности;
- цифровой TDI – как средство повышения SNR без увеличения апертуры;
- многоцелевые структуры на ЖК-дисплеях – за счет гибкости и отсутствия механических узлов.

Российские патенты, в частности RU 2624622 и RU 2635841, содержат оригинальные идеи, заслуживающие практической реализации. Зарубежные публикации указывают на отработанные технологические цепочки (наноимпринтинг, линейные переменные фильтры), которые могут быть адаптированы к отечественной элементной базе.

В ближайшей перспективе планируется создание экспериментального образца гибридной камеры на основе VLS-решетки, изготовленной методом наноимпринтинга, с использованием российского ПЗС-детектора, поддерживающего режим цифрового TDI.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щербина Г.А., Щербаков М.В. Многоцелевая гиперспектральная камера с комбинированным отслеживанием изображения. Патент RU 2624622 С1. Оpubл. 04.07.2017.
2. Хан Шеншенг, Лиу Цхентао, Ву Джианронг и др. Система формирования широкополосного гиперспектрального изображения на основе сжатого зондирования с нерегулярной дифракционной решеткой. Патент RU 2653772 С1. Оpubл. 14.05.2018.
3. Корнышев Н.П., Гареев В.М., Гареев М.В. и др. Телевизионное гиперспектральное устройство. Патент RU 230837 U1. Оpubл. 20.12.2023 (дата публикации уточнена по реестру).
4. Мельников Г.С., Самков В.М. Гиперспектральный 2D (изображающий) спектрофотометр рассеянных или вынужденных излучений в широком (определенном) спектральном диапазоне. Патент RU 2635841 С2. Оpubл. 20.11.2017.
5. Ansley D.A., Cook L.G. Multi-slit spectrometer. Patent WO 1998010254 A1. Publ. 12.03.1998.
6. Fan X., Liu C., Liu S., Xie Y., Zheng L., Wang T., Feng Q. The Instrument Design of Lightweight and Large Field of View High-Resolution Hyperspectral Camera // Sensors. 2021. Vol. 21, No 7. P. 2276. DOI: 10.3390/s21072276.
7. Chen J., Chen W., Zhang G., Lin H., Chen S.C. High-resolution compact spectrometer based on a custom-printed varied-line-spacing concave blazed grating // Optics Express. 2017. Vol. 25, No 11. P. 12446–12454.

© К. В. Бондаренко, 2026