

УДК 543.424

МАЛОГАБАРИТНЫЕ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРЫ С ОПЕРАТИВНОЙ РЕГИСТРАЦИЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© С. М. Борзов, П. Е. Котляр, О. И. Потатуркин

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: kotlyarpe@iae.nsk.su, borzov@iae.nsk.su, potaturkin@iae.nsk.su*

На основе анализа основных современных тенденций в сфере построения гиперспектральной аппаратуры показано, что при создании малогабаритных приборов нового поколения, ориентированных на применение в наземных системах наблюдения, перспективным является использование интегральных оптико-электронных схем и оптических узлов в планарном исполнении. В частности, отмечена целесообразность применения в системах сканирования микрозеркальных матриц, а в системах спектроразделения — планарных интерферометров Маха — Цендера. Это позволяет отказаться от громоздких, медленных и не всегда надёжных механических узлов и создавать приборы с оперативной регистрацией гиперспектральных изображений.

Ключевые слова: гиперспектральная аппаратура, микрозеркальное сканирование, электрооптика, спектральное разделение, интерферометр Маха — Цендера.

DOI: 10.15372/AUT20230613

EDN: BNVATG

Введение. Гиперспектральная (ГС) обработка изображений представляет собой раздел прикладной оптики, изучающий растровые изображения, каждый пиксел которых связан не с отдельным значением интенсивности света, а с полным спектральным разложением оптической энергии в границах какого-либо частотного диапазона. Основной идеей ГС-систем является концепция спектральной сигнатуры, т. е. предположения, что для любого заданного материала на основе присущей физической структуры и химического состава количество электромагнитного излучения, которое отражается или поглощается им, изменяется в зависимости от длины волны [1].

Термин «гиперспектральное изображение» был впервые введён в [2]. ГС-съёмка первоначально была разработана для горнодобывающей промышленности и геологии, применялась для поиска руды и нефти и долгое время ограничивалась лабораторным использованием. Сегодня ситуация стремительно меняется благодаря появлению компактных и доступных по цене ГС-камер, основанных на датчиках, монолитно интегрированных в формирователь изображений.

ГС-технологии начинают применяться в разных сферах, включая контроль и проверку сельскохозяйственных культур. Миниатюризация и невысокая стоимость делают их идеальным решением для медицинских приборов. Например, в настоящее время разрабатываются ГС-устройства для использования в офтальмологии. В будущем ГС-технологии вполне могут распространиться на бытовые приборы и устройства, такие как мобильные телефоны, где встроенный гиперспектральный датчик можно будет использовать для анализа пищевых продуктов в режиме реального времени, что позволит оперативно определять качество и свежесть продуктов.

Результаты ГС-съёмки могут эффективно применяться в любых приложениях для решения сложных задач классификации типов исследуемой поверхности, определения её состояния и динамики, выделения различий между близкими классами наблюдаемых объектов и т. д.

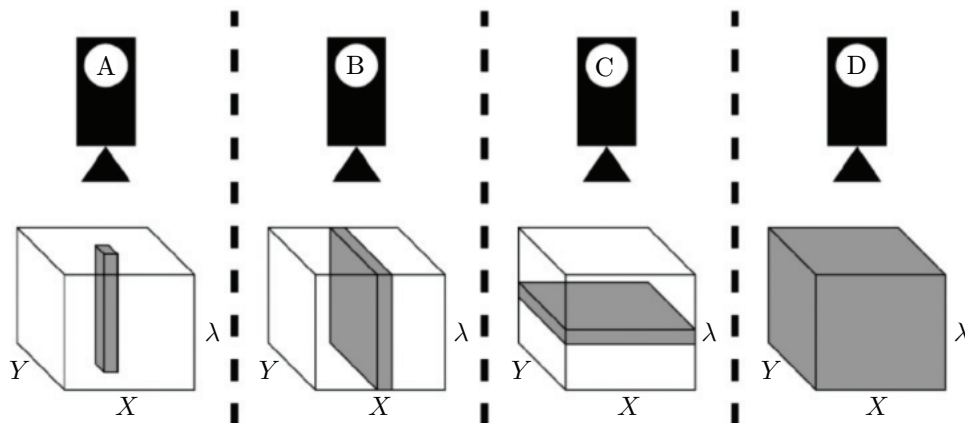


Рис. 1. Гиперспектральные режимы получения данных: А — whiskbroom; В, С — pushbroom; D — single shot

Целью работы являются анализ существующих подходов и разработка концепции построения малогабаритных гиперспектрометров, удобных в использовании и позволяющих осуществлять оперативную регистрацию данных для их дальнейшей тематической обработки.

Гиперспектральное изображение. При гиперспектральной регистрации формируется изображение, представляющее собой трёхмерный массив данных (гиперкуб данных), две координаты которого в плоскости X , Y соответствуют пространственным координатам зондируемого объекта, а третья λ — номеру спектрального канала, т. е. для каждого пиксела пространственного изображения зондируемого объекта осуществляется развёртка по длине волны λ (каждой точке изображения соответствует полный спектр).

Анализ современных разработок ГС-оборудования показывает наличие следующих тенденций:

- значительный рост выпуска ГС-спектрометров, предназначенных для систем наземного базирования и устанавливаемых на квадрокоптерах;
- стремление к миниатюризации ГС-спектрометров, снижению их массогабаритных характеристик и попытки полного отказа от механических узлов в блоках сканирования и спектрального разложения за счёт использования оптико-электронных узлов в планарном исполнении.

Формирование ГС-изображения. В соответствии с определением гиперспектрометра основными узлами устройства являются:

- система фрагментирования входного изображения за счёт оперативного управления входной апертурой, реализуемая путём механического сканирования или с применением современных пространственных модуляторов света на основе микрозеркальных матриц (МЗМ);
- система спектроразделения на основе полихроматора с диспергирующим элементом, разделяющим входной световой поток на спектральные составляющие.

На рис. 1 представлены четыре современных режима получения гиперспектральных данных: точечное сканирование (whiskbroom), линейное сканирование (pushbroom), плоское сканирование (pushbroom) и одиночный кадр (single shot) [3].

В режиме pushbroom (рис. 1, В) вместо пиксельного сканирования осуществляются сканирование объекта целевой диафрагмой и разложение излучения в спектр с использованием дисперсионных элементов. На каждом шаге сканирования регистрируется один срез ГС-изображения в плоскости X , λ , поэтому время формирования полного кадра с помощью такой камеры исчисляется несколькими секундами или даже минутами. Данный

режим наиболее распространён и позволяет создавать компактные устройства с малым весом, более простым управлением и более высоким уровнем сигнала. Он применяется, в частности, в системах космического и авиационного базирования, где сканирование исследуемой поверхности осуществляется за счёт движения аппарата носителя.

В режиме плоского сканирования, представленном на рис. 1, С, формируется массив поканальной записи, состоящий из нескольких изображений, снятых последовательно, каждое из которых содержит один срез ГС-изображения в плоскости X, Y . Режим pushbroom должен использоваться достаточно короткое время, чтобы избежать риска несоответствий в спектральном уровне полосы (насыщенности или недоэкспонирования). Плоское сканирование не подходит для движущихся сред и приложений, в которых камера или объекты наблюдения произвольно перемещаются в пространстве.

Режим, который получает все пространственные и спектральные данные одновременно (рис. 1, D), известен как одиночный кадр (single shot). Технология режима находится в стадии разработки. Режим не обеспечивает высокое пространственное разрешение и требует значительных вычислительных мощностей.

Щелевые технологии. Щелевые системы ввода светового потока являются обязательной атрибутикой большинства сканирующих ГС-приборов. Основное назначение входной щели заключается в чётком выделении фрагмента изображения для подачи его на систему спектроразделения. Размеры (ширина и высота) входной щели являются ключевым фактором, который влияет на пропускную способность спектрометра. От ширины изображения во входном отверстии зависит спектральное разрешение прибора, если он превышает ширину пиксела в детекторе. От ширины щели зависит угол расходимости попадающего внутрь света. Щели могут иметь разную ширину — от 5 до 800 мкм и более, высота щели составляет 1–2 мм (стандартно). В основном в спектрометрах используются щели шириной 10, 25, 50, 100, 200 мкм и т. д. В системах, в которых применяются оптические волокна для подачи светового пучка, размер пакета волокон должен совпадать с размером входной щели. Обычно это снижает рассеяние света и повышает пропускную способность прибора [4, 5].

Альтернатива «щелевого» сканирования. Одним из наиболее перспективных путей фрагментирования входного изображения за счёт оперативного управления входной апертурой является применение современных пространственных модуляторов света (ПМС), позволяющих оперативно управлять входной апертурой дисперсионного спектрометра.

Такой подход обеспечивает:

- возможность быстрой программной перенастройки прибора для работы в различных режимах;
- простую реализацию режима с электронно-управляемым сканированием формируемой ПМС входной щели;
- высокую скорость регистрации (кадр-спектр за миллисекунды);
- программное управление разрешением в широких пределах;
- возможность существенного ускорения получения гиперспектральной информации за счёт работы в интерактивном режиме с выбором для сканирования только информационно значимых участков объекта.

Проведённый анализ показывает, что в качестве ПМС в настоящий момент целесообразно применять не жидкокристаллические (ЖК) транспаранты, а МЗМ, производимые серийно фирмой Texas Instruments (США) для использования в видеопроекторах. Микрозеркальная матрица представляет собой упорядоченную двумерную структуру, содержащую порядка 10^6 микрозеркал размером 10–15 мкм каждое, которые можно независимо переключать из основного состояния в два положения, плоскости которых повёрнуты на угол ± 10 – 12° относительно нормали к плоскости матрицы.

Современные МЗМ обеспечивают высокое пространственное (мегапиксели) и временное разрешение (рабочая частота до 1800 Гц), высокую контрастность, малые потери света, высокий фактор заполнения ($>90\%$), почти полное отсутствие спектральной и поляризационной селективности (в отличие от ЖК-транспарантов), высокую надёжность.

В настоящее время Texas Instruments для гиперспектрального сканирования предлагает восемь МЗМ повышенного разрешения (с числом пикселей более 1 млн): DLP4500, DLP4500NIR, DLP6500FLQ, DLP6500FYE, DLP9000, DLP9000X, DLP9500 и DLP9500UV [5]. Матрица DLP4500NIR — модуль МЗМ со спектральным диапазоном 700–2500 нм, рабочей частотой 120 Гц, размерностью матрицы зеркал 912×1140 , размером зеркала 7,6 мкм и корпуса $20,7 \times 9,1 \times 3,33$ мм.

Важными достоинствами модуляции, осуществляемой МЗМ, являются: чрезвычайно высокая скорость ввода, малый размер пикселя, большое их количество и естественное отсутствие временных флуктуаций сигнала пикселя за время кадра, присущих жидкокристаллическим ПМС. Существенным недостатком МЗМ является наличие той или иной степени неплоскостности рабочего отражающего поля системы, определяющейся качеством изготовления чипа с микрозеркалами и поверхности окна корпуса микросхемы, приводящих к пространственным фазовым искажениям модулированного сигнала. Частота переключения положения каждого зеркала может достигать нескольких килогерц. В настоящее время скорость смены всего кадра модулятора ограничена возможностями управляющего интерфейса. Реально возможно достижение ввода изображений мегапиксельных размерностей с частотами кадра до 1 МГц, а в настоящее время для лучших серийных устройств обеспечивается скорость ввода на уровне 20–30 кГц, что обуславливает скорость ввода информации с помощью МЗМ на уровне нескольких десятков Гбит/с [6, 7].

Использование МЗМ для оперативного управления входной апертурой позволяет полностью обеспечить все режимы получения данных. Микрозеркальные матрицы также успешно применяются для систем генерации динамических сцен при тестировании тепловизионных приборов в дальнем ИК-диапазоне [8–10].

Разделение входного светового потока на спектральные составляющие.

Ключевым элементом спектральных приборов, определяющим их характеристики, является дисперсионное устройство [5]. В настоящее время основными методами построения спектральных изображений являются: сканирование по длине волны, пространственное сканирование [7].

В методах сканирования по длине волны реализуется последовательный метод анализа, который может осуществляться с помощью кругового переменного фильтра, набора фильтров, жидкокристаллического перестраиваемого или акустооптического перестраиваемого фильтра. В методе пространственного сканирования, который наиболее широко применяется при построении гиперспектральной аппаратуры, в качестве дисперсионного элемента используется призма или решётка. Применяются нарезные и голографические решётки. Нарезные решётки выполняются на поверхности с зеркальным покрытием. Голографические решётки создаются в результате интерференции двух УФ лазерных пучков на светочувствительном слое. Они отличаются стабильными спектральными характеристиками, но имеют более низкую дифракционную эффективность. Нарезные решётки довольно сильно рассеивают свет. Это происходит из-за неточности изготовления штрихов и приводит к ухудшению оптических характеристик. Голографические решётки позволяют снизить эффект рассеяния света и повысить выходные характеристики спектрометра. Важным преимуществом голографической решётки является возможность её создания на криволинейных поверхностях, что позволяет одновременно использовать решётку в качестве фокусирующего элемента. Спектрофотометры с решётками дают возможность измерять спектры в диапазоне от 180 нм до 12 мкм с разрешением, достигающим 0,03 нм.

Их недостатком является наличие излучения высших порядков дифракции и тот факт, что сканирование осуществляется за счёт поворота решёток [11].

Интерференционные фильтры на планарном электрооптическом интерферометре Маха — Цендера. Устройства спектрального разделения полихроматического оптического сигнала на отдельные спектральные составляющие широко используются в оптоволоконных системах связи и называются демультиплексорами. Современные технологии демультиплексирования обеспечивают разделение до 400 несущих с шагом между ними 0,2–0,8 нм с использованием планарного электрооптического интерферометра Маха — Цендера [12].

Принципиальным отличием такого интерферометра от классического является наличие в плечах электрооптических элементов, длина оптического пути в которых определяется изменением показателя преломления активной среды за счёт электрического поля (эффекта Поккельса). Электрооптический эффект практически безынерционен (быстродействие порядка 10^{-10} – 10^{-11} с), благодаря чему верхний предел частоты колебаний напряжённости электрического поля, в принципе, может достигать 100 ГГц. Огромный прогресс в развитии оптоволоконной связи позволил разработчикам элементной базы создать одну из первых фотонных интегральных схем — планарный интерферометр Маха — Цендера на кристалле ниобата лития.

Электрооптический эффект в ниобате лития состоит в изменении показателя преломления кристалла под действием электрического поля. В случае, когда световая волна, поляризованная вдоль оси Z , распространяется в направлении, перпендикулярном оси Z , показатель преломления линейно зависит от напряжённости электрического поля.

Ниобат лития прозрачен в диапазоне от 0,4 до 5 мкм, что делает его идеальным материалом для применения в интегрально-оптических устройствах [13].

Конструкция интегрального электрооптического модулятора Маха — Цендера. Интегральный электрооптический модулятор представляет собой интерферометр Маха — Цендера, изготовленный на X -срезе монокристалла ниобата лития. X -срезом называют тонкую пластину, вырезанную из монокристалла таким образом, что кристаллографическая ось X перпендикулярна, а кристаллографические оси Z и Y параллельны поверхности среза. Интерферометр состоит из двух Y -разветвителей, соединённых прямолинейными участками канальных волноводов (рис. 2).

Волноводы направлены вдоль кристаллографической оси Y и перпендикулярно оси Z . Рядом с волноводами напылены металлические электроды.

При изготовлении модулятора на поверхность пластины методом фотолитографии наносят защитные маски, через которые производят формирование волноводов и напыление электродов.

Показатель преломления канального световода оказывается больше, чем показатель преломления в объёме кристалла. Разность показателей преломления волновода и подложки (контрастность волновода) составляет около 0,1. Такая технология позволила создать интегральные интерферометры с полуволновым напряжением 3,2 В.

Оптическое лазерное излучение $P_{вх}$ подаётся на вход интерферометра Маха — Цендера по оптоволокну типа Panda, сохраняющему поляризацию излучения. В $Y1$ -разветвителе излучение разделяется на два равных по мощности (50 ± 2 %) потока и поступает в два плеча интерферометра. Оптическое излучение в волноводах должно быть поляризовано в направлении оси Z кристалла. Вдоль оси Z направлен и вектор напряжённости электрического поля между электродами. X -срез является главным сечением кристалла для волн, распространяющихся по волноводам. Волна, распространяющаяся по волноводу в направлении Y и поляризованная вдоль оси Z , является необыкновенной волной в кристалле.

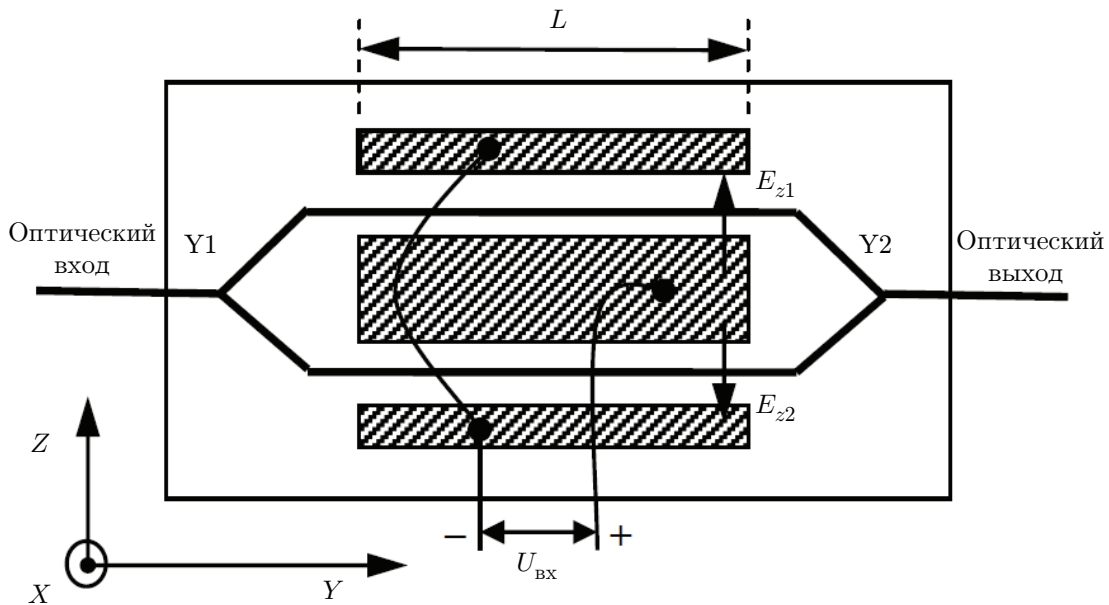


Рис. 2. Структурная схема интегрального электрооптического модулятора Маха — Цендера

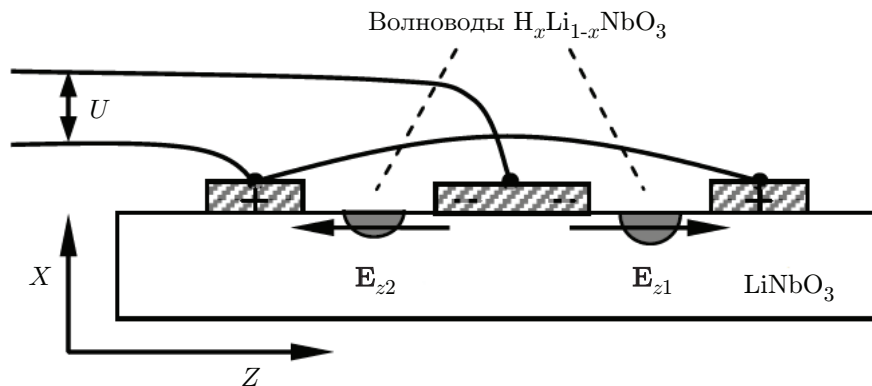


Рис. 3. Поперечное сечение модулятора Маха — Цендера

При подаче на электроды напряжения $U_{\text{вх}}$ в поверхностном слое кристалла, по которому проходят волноводы, возникают электрические поля

$$E_{z1} \approx E_{z2} \approx \frac{U_{\text{вх}}}{\varepsilon_e d},$$

где d — расстояние между электродами. Электрические поля в плечах интерферометра направлены в противоположные стороны (см. рис. 2), что вызывает равные по величине и противоположные по знаку изменения показателя преломления в волноводах за счёт электрооптического эффекта.

При распространении волн вдоль плеч интерферометра между ними возникает разность фаз, величина которой зависит от оптических длин волнопроводов. Оптическая длина определяется как физической длиной волновода, так и его показателем преломления (на рис. 3) [13, 14].

Компания Photline Technologies (Франция) производит интегрально-оптические интерферометры с разностью длины оптического пути до 1000 мкм. Ряд моделей модуляторов

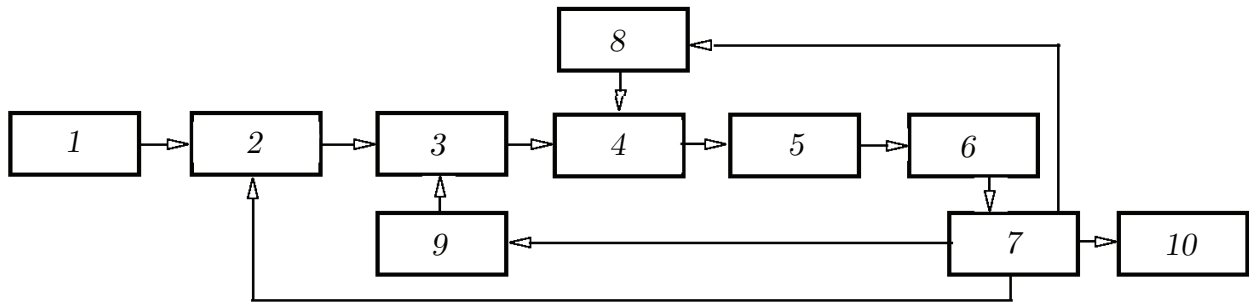


Рис. 4. Функциональная схема малогабаритного гиперспектрометра на основе интерферометра Маха — Цендера: 1 — входной объектив, 2 — микрозеркальная матрица, 3 — устройство сопряжения, 4 — интерферометр Маха — Цендера, 5 — выходной объектив, 6 — фотодетектор, 7 — компьютер, 8 — блок питания, 9 — блок калибровки, 10 — монитор

компании iXBlue (Франция) успешно используется в космических аппаратах и радиофотонных системах военного назначения (РЭБ, АФАР). Применение планарных интерферометров Маха — Цендера для спектрального разделения входного светового потока в гиперспектральных задачах представляется весьма перспективным, так как они успешно апробированы для выполнения демультимплексирования, применяемого в телекоммуникационных технологиях и многих специальных приложениях [15].

Малогабаритный гиперспектрометр на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС) и планарных фотонных микросхем с оптико-волоконной связью между оптическими элементами. На рис. 4 представлена одна из возможных структурных схем малогабаритного гиперспектрометра с использованием микрозеркальной матрицы и планарного электрооптического интерферометра Маха — Цендера. Входное изображение поступает на программируемую мегапиксельную МЗМ, которая осуществляет его фрагментирование, и через устройство согласования и одномодовое оптическое волокно передаёт на планарный интерферометр Маха — Цендера. Спектральное разделение осуществляется за счёт программируемого фазового сдвига, вызванного подачей постоянного напряжения на управляющие электроды интерферометра. Выделенная спектральная составляющая регистрируется матричным фотоприёмником. Волокно упрощает согласование оптических элементов, его диаметр должен приблизительно в 2 раза превышать апертуру фотоприёмника.

В данном приборе интерферометр Маха — Цендера осуществляет попиксельное последовательное сканирование входного изображения со спектральным разложением по длине волны. Его достоинствами являются очень высокое разрешение по длине волны, простота выделения спектральных составляющих подачей постоянного напряжения на планарные каналы и полное отсутствие каких-либо механических узлов.

Покадровый гиперспектрометр на основе спектральных фильтров, нанесённых непосредственно на поверхность КМОП-сенсора. Альтернативным вариантом являются кадровые гиперспектрометры (реализующие режим single shot) с нанесёнными узкими спектральными фильтрами непосредственно на поверхность КМОП-сенсора (КМОП — комплементарная логика на транзисторах металл—оксид—полупроводник) на уровне полупроводниковой пластины [16–20]. Сенсор таких приборов делится на группы пикселей, каждая из которых имеет определённый спектральный фильтр, и результирующее ГС-изображение формируется из соответствующих пикселей разных групп одновременно в заданном поле зрения. Например, двухмегапиксельный сенсор CMOSIS модели CMV2000 (Бельгия) вмещает 32 плиточные секции с разрешением

256 × 256 пикселей каждая. В итоге формируется 32-канальное 12-битовое изображение с разрешением 256 × 256 пикселей со скоростью около 30 кадр/с при дневном освещении и до 340 кадр/с (в 10-битовом режиме) в лабораторных условиях с чувствительностью в видимом и ближнем ИК-диапазонах (600–1000 нм с шириной каналов 12 нм).

Компания Ximea GmbH (Германия) — разработчик систем машинного зрения, промышленных и научных камер, интегрировала двухмегапиксельный сенсор CMOSIS модели CMV2000 в свои сверхкомпактные и лёгкие камеры серий xiQ и xiSpec. Вес таких камер составляет 27 г при размерах 26,4 × 26,4 × 21,6 мм и потребляемой мощности 1,8 Вт, что делает их самыми маленькими промышленными камерами HSI USB3 [21].

Такие системы должны быть приспособлены к конкретным применениям путём определения необходимого количества и ширины спектральных полос, а также разрешения изображения в каждом диапазоне спектра. Выбор спектральных интервалов, их числа и расположения, как правило, производится на этапе проектирования систем и в процессе эксплуатации не изменяется [16–19]. Однако известны попытки создания систем с перенастраиваемыми характеристиками.

Реализация режима выборочной спектральной адресации осуществима, например, с помощью перестраиваемых акустооптических фильтров [22, 23], в которых возможен режим управления шириной спектрального окна и одновременного получения сразу нескольких спектральных изображений [24, 25]. Они основаны на динамических дифракционных решётках, возбуждаемых акустической ультразвуковой волной, и осуществляют спектральную фильтрацию световых пучков без существенных искажений переносимых ими изображений. Главными преимуществами акустооптических фильтров являются: программное управление с перестройкой по спектру за микросекунды, отсутствие подвижных механических элементов, малые габариты, высокое качество получаемых изображений, высокое спектральное разрешение (до 0,1 нм), возможность создания гибких алгоритмов гиперспектрального анализа благодаря произвольной спектральной адресации в пределах рабочего интервала длин волн.

Управление пространственным разрешением и разрядностью квантования отдельных пикселей или их групп возможно на базе, например, современных технологий КМОП-матриц регистрации светового потока, обладающих гибкими возможностями изменения режимов работы фотоприёмника и позволяющих выполнять сложение сигналов отдельных пикселей, а также выбирать из общего массива рабочее окно произвольного расположения и размера [26]. Камеры высокого разрешения на основе КМОП-матриц позволяют переключать разрешение в меньшую сторону за счёт прореживания элементов или путём вырезания активного окна. В режиме выделения активного окна можно в любом месте матрицы указать положение и размер этого окна.

При этом требуется экспериментальное обоснование целесообразности управления информационными параметрами (пространственное и спектральное разрешение, разрядность квантования яркости сигналов) для адаптивного функционирования перспективной гиперспектральной системы. Так, в работах [27–29] обоснована эффективность пространственно-спектральной классификации на различных этапах обработки ГС-изображений, заключающейся в усреднении сигналов отдельных групп близкорасположенных пикселей. В [30–31] приведена методика и выполнено экспериментальное обоснование возможности снижения спектральной размерности гиперспектральных данных при решении задач классификации сельскохозяйственных культур. Показано, что выбор по определённому алгоритму нескольких спектральных каналов (10) и их ширины (объединение близлежащих от выбранного канала) незначительно снижает качество классификации по сравнению с классификацией по всей выборке спектральных каналов (200). В системах рассматриваемого типа подобное сокращение информативности неизбежно и

обусловлено их конструктивными особенностями. При этом оно имеет определённые ограничения по сравнению с цифровой обработкой полного набора ГС-данных. В частности, пространственное сглаживание осуществляется поблочно, а не скользящим окном, как при спектрально-пространственной обработке, а спектральные каналы должны быть выбраны из имеющихся, а не сформированы путём их линейной комбинации, как в методе главных компонент.

Заключение. Таким образом, современные технологии делают гиперспектрометры сравнительно доступными для множества применений: они достаточно компактны, легки и пригодны для использования в качестве систем наблюдения различного назначения.

Наиболее перспективным на сегодняшний день представляется создание малогабаритных ГС-приборов на основе МЭМС и планарных фотонных микросхем с оптико-волоконной связью между оптическими элементами, базирующееся на использовании коммерчески доступных ключевых элементов, серийное производство которых в настоящее время освоено ведущими фирмами-разработчиками систем машинного зрения. Такие системы, реализуя попиксельное последовательное сканирование входного изображения со спектральным разложением по длине волны с применением интерферометров Маха — Цендера при полном отсутствии каких-либо механических узлов, позволяют создавать надёжные, легко перенастраиваемые, удобные на практике приборы оперативной регистрации гиперспектральных изображений.

В качестве альтернативного решения могут рассматриваться покадровые спектрометры с мозаичными интерференционными фильтрами различного типа, нанесёнными непосредственно на поверхность КМОП-сенсора. Однако при их создании необходимо экспериментальное обоснование целесообразности выбора тех либо других информационных параметров (пространственного и спектрального разрешения, разрядности квантования яркости сигналов) для решения конкретных прикладных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Исимару А.** Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 1. М.: Мир, 1980. 280 с.
2. **Goetz A. F. H., Vane G., Soloman J. E., Rock B. N.** Imaging spectrometry of Earth remote sensing // *Science*. 1985. **228**, N 4704. P. 1147–1153.
3. **Лу Б., Дао Ф. Д., Лю Ц. и др.** Последние достижения в области технологий представления гиперспектральных данных и их применение в сельском хозяйстве // URL: https://gisproxima.ru/posledniye_dostizheniya_v_oblasti_tekhnologiy (дата обращения: 24.10.2023).
4. **Кукушкин Д. Е., Сазоненко Д. А., Бахолдин А. В., Красавцев В. М.** Моделирование спектральных систем. Ч. 1. С.-Пб.: Университет ИТМО, 2021. 99 с.
5. **Пейсахсон И. В.** Оптика спектральных приборов. Л.: Машиностроение, 1975. 312 с.
6. **Технологии МЭМС в спектрофотометрии.** Цифровое матричное зеркало DMD от TexasInstruments 08-06-2017. URL: <https://www.rlocman.ru/review/article.html?di=336157> (дата обращения: 27.10.2023).
7. **Garini Y., Young I. T., McNamara G.** Spectral imaging: Principles and applications // *Cytometry A*. 2006. **69A**, Iss. 8. P. 735–747. DOI: 10.1002/cyto.a.20311.
8. **Гибин И. С., Козик В. И., Нежевенко Е. С.** Макетирование и экспериментальное исследование систем генерации динамической сцены для тестирования тепловизионных приборов // *Автометрия*. 2013. **49**, № 1. С. 80–86.

9. **Гибин И. С., Козик В. И., Нежевенко Е. С.** Генерация динамических сцен для тестирования тепловизионных приборов в дальнем ИК-диапазоне // *Автометрия*. 2018. **54**, № 1. С. 10–16. DOI: 10.15372/AUT20180102.
10. **Гибин И. С., Козик В. И., Нежевенко Е. С.** Источники излучения для проекторов инфракрасных сцен // *Прикладная физика*. 2019. № 2. С. 67–72.
11. **Соколова Е. А.** Дифракционные решётки нового поколения: Дисс. д-ра техн. наук. С.-Пб.: 2000. 289 с.
12. **Слепов Н.** Оптические мультиплексоры и демultipлексоры систем WDM // *Электроника. Наука. Технология. Бизнес*. 2004. **58**, № 8. С. 42–47.
13. **Вольхин И. Л., Ажеганов А. С.** Исследование интегрального электрооптического модулятора на основе интерферометра Маха – Цендера. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2020. 23 с.
14. **Петров В. М., Шамрай А. В.** СВЧ интегрально-оптические модуляторы. Теория и практика. С.-Пб.: Университет ИТМО, 2021. 225 с.
15. **Yang Z., Albrow-Owen T., Cai W., Hasan T.** Miniaturization of optical spectrometers // *Science*. 2021. **371**, Iss. 6528. P. 1–12. DOI: 10.1126/science.abe0722.
16. **Tack N., Lambrechts A., Soussan S., Haspeslagh L.** A compact, high-speed, and low-cost hyperspectral imager // *Proc. of SPIE*. 2012. **8266**. P. 82660Q1-13.
17. **Geelen B., Tack N., Lambrechts A.** A snapshot multispectral imager with integrated, tiled filters and optical duplication // *Proc. of SPIE*. 2013. **8613**. P. 861314-1-13.
18. **Gat N.** Imaging spectroscopy using tunable filters: A review // *Proc. of SPIE*. 2000. **4056**. P. 50–64.
19. **Correia J. H., Bartek M., Wolffenbuttel R. F.** High-selectivity single-chip spectrometer in silicon for operation in visible part of the spectrum // *IEEE Trans. Electron Devices*. 2000. **47**, Iss. 3. P. 553–559.
20. **Jayapala M., Lambrechts A., Tack N. et al.** Monolithic integration of flexible spectral filters with CMOS image sensors at wafer level for low cost hyperspectral imaging, 2013. URL: http://www.imagesensors.org/Past%20%Workshops/2013%20Workshop/2013%20Papers/07-02_053jayapala.pdf. - 2015 (дата обращения: 24.10.2023).
21. **Шведов А.** Гиперспектральные сенсоры компании IMEC. Решения для высококачественного спектрального анализа. URL: <https://www.npk-photonica.ru/giperspektralnye-sensory-kompanii-imec-pdf163406.pdf> (дата обращения: 24.10.2023).
22. **Пожар В. Э., Мачихин А. С., Гапонов М. И. и др.** Гиперспектрометр на основе перестраиваемых акустооптических фильтров для БПЛА // *Светотехника*. 2018. № 4. С. 47–50.
23. **Мазур М. М., Пожар В. Э.** Спектрометры на акустооптических фильтрах // *Измерительная техника*. 2015. № 9. С. 29–33.
24. **Мазур М. М., Судденок Ю. А., Пожар В. Э.** Многооконные акустооптические фильтры для корреляционной спектроскопии // *Оптика и спектроскопия*. 2020. **128**, вып. 2. С. 284–289.
25. **Пожар В. Э., Великовский Д. Ю.** Спектральное распознавание объектов с помощью многооконных акустооптических фильтров // *Оптика и спектроскопия*. 2020. **129**, № 1. С. 1035–1041.
26. **Горбачёв А. А., Коротаев В. В., Ярышев С. Н.** Твердотельные матричные фотопреобразователи и камеры на их основе. С.-Пб.: НИУ ИТМО, 2013. 98 с.
27. **Борзов С. М., Потатуркин А. О., Потатуркин О. И., Федотов А. М.** Исследование эффективности классификации гиперспектральных спутниковых изображений природных и антропогенных территорий // *Автометрия*. 2016. **52**, № 1. С. 3–14. DOI: 10.15372/AUT20160101.

28. **Борзов С. М., Потатуркин О. И.** Исследование эффективности спектрально-пространственной классификации данных гиперспектральных наблюдений // *Автометрия*. 2017. **53**, № 1. С. 32–42. DOI: 10.15372/AUT20170105.
29. **Борзов С. М., Потатуркин О. И.** Повышение эффективности классификации гиперспектральных изображений за счёт разномасштабной пространственной обработки // *Компьютерная оптика*. 2020. **44**, № 6. С. 937–943.
30. **Борзов С. М., Потатуркин О. И.** Выбор информативной системы признаков при классификации сельскохозяйственных культур по гиперспектральным данным // *Автометрия*. 2020. **56**, № 4. С. 134–144. DOI: 10.15372/AUT20200414.
31. **Шипко В. В., Борзов С. М.** Исследование эффективности классификации гиперспектральных данных при ограничениях на разрядность квантования, количество спектральных каналов и пространственное разрешение // *Автометрия*. 2022. **58**, № 3. С. 79–87. DOI: 10.15372/AUT20220309.

Поступила в редакцию 24.10.2023

После доработки 27.10.2023

Принята к публикации 27.10.2023
