

Международная академия «КОНТЕНАНТ»
ОАО «Красногорский завод им.С.А. Зверева»

СБОРНИК ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ
научно-технической конференции
«ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ТЕХНОЛОГИИ»



г. Красногорск
17-18 января 2013 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Пленарные доклады

Хайлов М.Н., Заичко В.А.	Гиперспектральная съемка – перспективы использования в интересах решения социально-экономических задач	10
Пустовойт В.И., Пожар В.Э.	Гиперспектральные акустооптические системы видения и распознавания	12
Бондур В.Г.	Современные подходы к обработке гиперспектральных аэрокосмических изображений	14
Асмус В.В., Рублев А.Н., Успенский А.Б.	Современное состояние и перспективы спутникового гиперспектрального атмосферного зондирования	19
Молчанов А.С.	Состояние, развитие и применение гиперспектральных технологий в аэрокомплексах и системах воздушной разведки	21
Ахметов Р.Н., Стратилатов Н.Р., Юдаков А.А., Везенов В.И., Еремеев В.В.	Основные направления исследований по созданию технологий обработки данных гиперспектральной съемки Земли	23
Архипов С.А., Ляхов А.Ю., Тарасов А.П.	Работы ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» по созданию гиперспектральных приборов дистанционного зондирования	25

Секция 1

Гиперспектральная аппаратура (видеоспектрометры)

Гулис И. М., Воропай Е. С., Купреев А. Г., Костюкевич А. Г.	Гиперспектральные приборы с микрозеркальной матрицей и дисперсионные монохроматоры изображений	32
Мазур М.М., Шорин В.Н., Епихин В.М., Судденко Ю.А., Кияченко Ю.Ф., Мазур Л.И., Пальцев Л.Л.	Гиперспектральные регистрирующие системы видимого и ближнего ИК диапазонов на основе акустооптических фильтров	35
Пожар В.Э., Пустовойт В.И., Табачкова К.И.	Методы оптимизации гиперспектральных измерений с использованием акустооптических фильтров	39

Ахметьянов В.Р., Николенко А.А. Терентьева В.В.	Развитие космической гиперспектральной аппаратуры за рубежом	41
Архипов С.А., Кравченко С.О., Ли А.В., Линько В.М., Морозов С.А., Сальникова М.А.	Гиперспектральная аппаратура для космического аппарата «Ресурс-П»: направления модернизации и перспективы развития	43
Архипов С.А., Кравченко С.О., Ли А.В., Линько В.М., Морозов С.А.	Схемные решения оптического тракта изображающих спектрометров	44
Стариченкова В.Д., Самохина И. А., Чиванов А.Н.	Особенности оптических систем для многоканального гиперспектрометра	46
Савицкий А.М., Сокольский М.Н. Бакланов А.И., Клюшников М.В.	Оптические системы гиперспектрометров космических телескопов	48
Бакланов А.И., Забиякин А.С., Семина В.А., Серёгина А.С.	Система приема и преобразования информации для гиперспектральной съемочной аппаратуры (СПШИ-ГСА). Основные понятия.	49
Вишневский Г.И., Четвергов М.В., Красовский А.С., Выдревич М.Г., Курова О.П.	ФПЗС «Кадр-РП» для гиперспектральной аппаратуры	54
Груздев В.Н., Шилин Б.В.	Видеоспектральные исследования за рубежом	58
Алексеев А.А., Груздев В.Н., Шилин Б.В. Красавцев В.М., Чиков К.Н.	Летные испытания видеоспектрометров СПбУИТМО с полихроматором на дифракционной решетке	60
Беляковский В.И., Сикорский Д.А., Котов М.Н., Климович Т.В.	Бортовой комплекс дистанционного зондирования Земли среднего разрешения для микроспутников	62

Ризванов А.А., Вороков А.В.	Спектрометр для определения газового состава и содержания аэрозолей в атмосфере Земли СА-МП для перспективного космического аппарата «Метеор-МП» №1	63
Перчик А.В., Боритко С.В.	Акустооптический микровидеоспектрометр	64
Зимин А.М., Тройнов В.И.	Аппаратная и программно-алгоритмическая реализация пространственно-распределенных спектральных измерений в режиме удаленного доступа	67
Кушнарев К.Г.	Апохроматические объективы для гиперспектральной аппаратуры.	69
Гасилина О.В., Смирнов А.В.	Стенд функционального контроля электронных блоков для оптико-электронных систем	70

Секции 2, 3

Изображающие Фурье-спектрометры. Приборы радиационного, химического, биологического мониторинга.

Горбунов Г.Г.	Фурье-спектровизоры	73
Ефимов И.Н., Григорьев А.А., Шлыгин П.Е., Позвонков А.А.	Оценка возможности применения инфракрасных фурье-спектрометрических приборов для дистанционного химического мониторинга	75
Фуфурин И.Л., Морозов А.Н.	Трассовый метод химического мониторинга с применением активной подсветки	77
Морозов А.Н., Васильев Н.С.	Алгоритм идентификации веществ по набору спектров вторичного излучения	80
Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Мацицкий Ю.П., Никулин А.Г., Монахов Д.О., Козлов Д.А., Болмосов И.В., Козлов И.А., Архипов С.А., Целиков В.А., Романовский А.С.	Бортовой инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2: характеристики летного образца	83
Королёв П. А., Карфидов А. О. Миронов А. И.	Многоэлементный фурье-спектрометр, работающий в ИК-диапазоне	88

Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Никулин А.Г., Монахов Д.О., Козлов Д.А., Болмосов И.В., Козлов И.А., Архипов С.А., Целиков В.А., Кушнарев К.Г., Тышкун Н.В., Романовский А.С.	Инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-3 для КА «Метеор-МП»	85
Вагин В.А., Жарков А.В., Крадецкий В.В., Мошкин Б.Е., Романовский А.С., Хорохорин А.И., Шилов М.А.	Многоцелевой фурье-спектрометр космического базирования. Экспериментальный образец	86
Голяк И.С, Морозов А.Н.	К улучшению двумерных интерференционных картин, получаемых со статического фурье-спектрометра	90
Горелик В. С., Литвинова А. О.	Рефрактивные сенсоры на основе глобулярных фотонных кристаллов	92
Баронкин А.С., Платанов С.Ю., Романовский А.С., Хохлов С.А.	Особенности проектирования и разработки программного обеспечения для задач управления и обработки сигналов фурье-спектрометров космического базирования	95
Монахов Д.О., Ушаков Н.Н.	Тепловая модель бортовой аппаратуры высокого спектрального разрешения	96
Архипов С.А., Зубко А.В., Лалакин А.В.	Аналитическая методика оценки радиационных нагрузок от ионизирующих излучений космического пространства на элементы космической аппаратуры дистанционного зондирования Земли.	97

Секции 4, 5

Методическое и программное обеспечение гиперспектральных технологий. Практическое применение гиперспектральных технологий.

<p>Чапурский Л.И., Алексеев А.А., Астахова Е.И., Григорьева О.В., Жадковский А.В., Жуков Д.В., Терентьева В.В., Кудрявцев С.В.</p>	<p>Опыт использования призмного видеоспектрометра «Лептон» для измерения отражательных свойств элементов наземной тестовой мишенной обстановки</p>	<p>100</p>
<p>Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е.В., Каменцев В.П.</p>	<p>Вычислительная система обработки данных гиперспектрального аэрокосмического зондирования</p>	<p>102</p>
<p>Чабан Л.Н., Николенко А.А., Страхов П.В., Шурыгин Б.М.</p>	<p>Методическое и программное обеспечение тематической обработки аэрокосмических гиперспектральных изображений. Проблемы и перспективы</p>	<p>104</p>
<p>Остриков В.Н., Плахотников О.В.</p>	<p>Влияние предварительной обработки данных гиперспектральной съемки на качество их тематического анализа</p>	<p>107</p>
<p>Остриков В.Н., Плахотников О.В.</p>	<p>Калибровка гиперспектральных данных авиационной съемки по сопутствующим наземным измерениям эталонных поверхностей наблюдаемых сцен</p>	<p>109</p>
<p>Тишкин Р.В., Юдаков А.А.</p>	<p>Классификация объектов земной поверхности о данным гиперспектральной съемки на основе методов искусственного интеллекта</p>	<p>111</p>
<p>Макаренков А.А., Москвитин А.Э.</p>	<p>Информационные технологии комплексирования материалов гиперспектральной съемки Земли с данными от других съемочных систем</p>	<p>112</p>
<p>Седельников В.П., Лукашевич Е.Л., Карпухина О.А.</p>	<p>Бортовой видеоспектрометр «Сокол-ГЦП»: результаты летных испытаний и опытной аэросъемки</p>	<p>113</p>
<p>Карпухина О.А.</p>	<p>Опыт использования данных гиперспектральной аэросъемки для обнаружения наркотикосодержащей растительности</p>	<p>115</p>

Постыляков О.В., Боровский А.Н., Локштанов С.Е., Еланский Н.Ф., Беликов Ю.Е., Митин И.В.	О влиянии атмосферы на входной сигнал спутниковой аппаратуры ДЗЗ над высокогорным валидационным полигоном в видимом и БИК спектральных диапазонах	117
Горюнова В.Н.	Инновационный подход к комплексной тематической обработке материалов ДЗЗ	119
Алексеев А.А., Шилин Б.В.	Методика и результаты полевых видеоспектральных исследований	121
Григорьева О.В., Марков А.В., Бровкина О.В., Жуков Д.В., Мочалов В.Ф., Алексеев А.А.	Разработка алгоритмов эффективной тематической обработки данных гиперспектральных систем для идентификации объектов ландшафта	122
Григорьева О.В., Жуков Д.В., Чапурский Л.И., Терентьева В.В.	Использование гиперспектральной съемки в диапазоне 0,4-2,5 мкм для идентификации участков деградации лесов в районе подтопления и аэрогенного загрязнения территорий	125
Григорьев А.Н.	Методика формирования спектральных характеристик объектов на основе мультивременных данных космической гиперспектральной съемки	128
Григорьев А.Н.	Топографическая радиометрическая коррекция данных космической гиперспектральной съемки	130
Архипов С.А., Бутяйкин Н.А., Гасич Г.В., Линько В.М., Ли А.В., Лузганова М.Ю. Морозова С.П. Панфилов А.С.	Калибровка шкалы длин волн гиперспектрометра	132
Архипов С.А., Бутяйкин Н.А., Гасич Г.В., Линько В.М., Ли А.В., Лузганова М.Ю. Морозова С.П. Панфилов А.С.	Калибровка чувствительности гиперспектрометра	134

Гасич Г.В., Линько В.М., Лузганова М.Ю.	Оптимизация параметров экспонирования ГСА РП	135
Архипов С.А., Бутяйкин Н.А., Ли А.В., Линько В.М., Лузганова М.Ю.	Предварительная обработка гиперспектральной видеоинформации ГСА РП	136
Тутубалина О.В., Зимин М.В., Голубева Е.И., Краснушкин А.В., Михеева А.И.	Исследование спектральных свойств северной растительности по данным наземных измерений гиперспектрометром и многоканальным спектрометром	137

Секция 6

Проблемы создания съемочных приборов субмиллиметрового диапазона спектра

Пирогов Ю.А.	Пассивное радиовидение в миллиметровом диапазоне	139
Батова С.С., Пирогов Ю.А., Чуличков А.И.	Сверхразрешение в системах пассивного радиовидения	140
Паулиш А.Г., Федоринин, В.Н., Кузнецов С.А., Аржанников А.В.	Многоспектральные системы для субмиллиметрового диапазона на основе субММ-ИК конвертера	142
Ивашов С.И., Бугаев А.С., Веретин В.С.	Использование активно-пассивных радиометров миллиметрового диапазона для обнаружения скрытых объектов	145

Пленарные доклады

Гиперспектральная съемка – перспективы использования в интересах решения социально-экономических задач

Хайлов М.Н. , Заичко В.А.

Федеральное космическое агенство, Г. Москва

opoi@roscosmos.ru

Стратегия развития российских средств ДЗЗ до 2020 года направлена на создание и комплексное использование космической системы ДЗЗ, которая будет развиваться в рамках специализированных по целевому назначению систем, объединенных космическими системами ретрансляции, наземными комплексами приема, обработки и распространения информации и валидационными системами. Запланировано создание и ввод в действие ряда космических аппаратов, оснащенных гиперспектральной аппаратурой (ГСА): два малых космических аппарата для фундаментальных исследований и двух многофункциональных космических аппарата серии «Ресурс-П».

Необходимо отметить три основные тенденции развития российских средств ДЗЗ:

1. Поэтапное достижение общемирового уровня пространственного разрешения сканирующих устройств – до 0,5 м, что естественным образом расширяет возможности дистанционного зондирования по оценке состояния все большее мелких объектов на земной поверхности вплоть до крон отдельно стоящих деревьев и зданий.
2. Широкое использование геоинформационных сервисов для повышения оперативности съемки в интересах решения задач мониторинга окружающей среды и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.
3. Внедрение технологий гиперспектральной съемки в видимом и ближнем инфракрасном диапазонных спектра с высоким радиометрическим разрешением, на основе которых выявляются разного рода «тонкие» эффекты природных явлений.

Одним из основных факторов развития технологий ДЗЗ является поиск и апробация новых научных подходов к решению практических социально-экономических задач. В настоящее время возможностей оптико-электронной аппаратуры ДЗЗ недостаточно для решения специализированных задач, необходимо выявление узких линий поглощения, характерных, прежде всего, для минеральных веществ, газов и воды. При этом очевидно наличие методико-алгоритмических и технологических проблем, ограничивающих практическое использование гиперспектральных средств ДЗЗ.

Таким образом, на текущем этапе развития технологий ДЗЗ гиперспектральная аппаратура – это научно-исследовательских тип приборов ДЗЗ для решения социально-экономических задач.

Результаты гиперспектральных измерений могут эффективно использоваться для решения сложных задач обнаружения малоразмерных объектов, идентификации объектов исследуемой поверхности, определения их

состояния и динамики, выделения различий между близкими классами в следующих областях: сельское и лесное хозяйство, землепользование, климатология, контроль водных ресурсов, поиск полезных ископаемых и энергоносителей, видовой военная разведка, мониторинг чрезвычайных ситуаций.

К российским космическим аппаратам с установленной гиперспектральной аппаратурой относятся МКА-ФКИ (ПН1) и «Ресурс-П».

На сегодняшний день существует зависимость получаемых результатов съемки от температурного режима гиперспектрального датчика, возможность достижения оптимального температурного режима требует дальнейших экспериментов. Для получения качественных данных гиперспектральной съемки требуется проведение атмосферной и радиометрической коррекции, что ставит задачи проведения синхронных съемок с использованием наземной и авиационной аппаратуры. Сформирована рабочая группа из представителей организаций отрасли (КМЗ им. С.А. Зверева, МФТИ, НПО «Лептон», РГРТУ и др.), основной задачей которой является анализ качества поступающей информации и результатов ее обработки, подготовка предложений по совершенствованию технологии целевого использования аппаратуры и обработки гиперспектральной информации, включая тематические продукты для предоставления потребителям.

Перспективы развития гиперспектральных технологий ДЗЗ в России:

1. Необходимы продолжение исследований и поэтапный переход от научного использования гиперспектральной информации – КА «МКА ФКИ» к этапу практического использования в составе группировки КА «Ресурс-П».
2. Целесообразно развитие гиперспектральных технологий в области теплового излучения (до 13 мкм), улучшение пространственного разрешения (до 10 м) и увеличение полосы обзора в рамках создания перспективных космических комплексов в рамках ФКП России.
3. Необходимы создание и регулярная актуализация общедоступных (для научного сообщества) банков спектральных эталонов, в том числе и для обеспечения атмосферной коррекции данных, в рамках выполнения мероприятий ФКП России – ОКР «Регион-В-Валидация-РК» и «Регион В-Архив».
4. Расширение сферы использования опыта международного сообщества в области гиперспектральных технологий:
 - 4.1. В рамках Рабочей группы по калибровке и валидации при Комитете по спутникам наблюдения Земли (CEOS WGCV), членом которой является Роскосмос;
 - 4.2. В рамках Диалога Россия – Евросоюз по космосу / Рамочных программ Еврокомиссии / Программы «Глобальный мониторинг окружающей среды и безопасность» (GMES), участниками которой являются организации Роскосмоса и РАН (проекты MAIRES, ZAPAS и др.).

Гиперспектральные акустооптические системы видения и распознавания

Пустовойт В.И., Пожар В.Э.
НТЦ уникального приборостроения РАН,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
vlad_pst@yahoo.com

Спектральные характеристики объекта непосредственно связаны с энергетической структурой веществ, входящих в его состав, и тем самым несут информацию о составе объекта, его структуре, состоянии и т.п. Расшифровка и интерпретация этих свойств, однако, представляет собой исключительно сложную задачу. В тоже время живые системы с успехом решают многие задачи этого типа. Например, человеческий глаз, имеющий лишь три цветовых канала, причем сильно перекрывающихся, способен различать миллионы оттенков, что позволяет решать разнообразные практические проблемы, связанные с жизнедеятельностью.

Вместе с тем добавление лишь одного канала делает систему намного более избирательной, как свидетельствует сравнение зрения человека со зрением птиц [1], обладающих 4-м каналом в ближнем УФ диапазоне. Таким образом, в проблемах “видения” и распознавания принципиально важную роль играет и система регистрации, и система анализа.

Зрение живых существ, оптимизированное в ходе эволюции, дает многочисленные примеры адаптации к различным условиям существования и к разным жизненным задачам. Например, рыбы-цихлиды (*Cichlidae*), обитающие в африканских озерах, имеют 6 различных цветовых рецепторов [2], что позволяет оптимизировать зрительное восприятие при различной мутности воды: в поверхностных и придонных слоях.

Ротоногие раки вида *Neogonodactylus oerstedii* имеют 12 различных фоторецепторных пигментов и еще 4 пигмента для спектральной фильтрации [3], что является огромной эволюционной нагрузкой, однако оказывается оправданным в условиях их существования. Этот же отряд ракообразных *Stomatopoda* обладает к тому же еще и поляризационной чувствительностью во всем видимом диапазоне [4].

Таким образом, оптимальное решение системы цветовосприятия окружающего мира существенно зависит от условий анализа и от решаемой задачи.

С этой точки зрения гиперспектральные устройства на программно-управляемых акустооптических (АО) фильтрах [5] предоставляют уникальные возможности для технической реализации подобных систем. Узкая полоса пропускания АО фильтров (0,1-10 нм) в сочетании с поляризационной чувствительностью и возможностью создания сложной передаточной функции позволяет синтезировать (имитировать) цветовые каналы живых систем. А программное управление в реальном времени (0,1-10 мс) позволяет реализовать

алгоритмы обработки, характерные для живых систем. Т.е. программно-управляемые АО фильтры обеспечивают возможности для копирования цветowych зрительных систем животного мира и изучения их функционирования.

Но также они позволяют разрабатывать и реализовывать принципиально новые типы спектроаналитических систем, не встречающиеся в живом мире. А именно, намного более узкая полоса АО фильтра ($\lambda/\Delta\lambda \sim 10^2-10^3$) в сравнение с интервалом чувствительности белков-опсинов живых существ ($\lambda/\Delta\lambda \sim 10$) позволяет включать в систему спектральные каналы, чувствительные к узкополосным особенностям спектра, например, к присутствию в спектре лазерного излучения. Другая интересная возможность - создание многополосных фильтров, позволяющих проводить спектральное корреляционное выделение физических признаков объекта, обеспечивающее тем самым более высокую достоверность обнаружения объекта.

Таким образом, гиперспектральные системы, создаваемые на основе программно-управляемых АО фильтров, дают реальную возможность создания спектроаналитических систем реального времени, воспроизводящих зрение живых организмов и использующих эти принципы для существенного прогресса в задачах экспресс-распознавания.

Литература

1. Голдсмит Т. Что видят птицы. В мире науки, 2006, №10, с.44-51.
2. Hofmann C.M., et al. (2009) The Eyes Have It: Regulatory and Structural Changes Both Underlie Cichlid Visual Pigment Diversity. PLoS Biol 7(12): e1000266.
3. Marshall J., Oberwinkler J. Ultraviolet vision: the colourful world of the mantis shrimp. Nature, 401 (6756): 873–874, 1999.
4. N.W. Roberts, T.H. Chiou, N.J. Marshall, T.W. Cronin. A biological quarter-wave retarder with excellent achromaticity in the visible wavelength region. Nature Photonics 3 (11): 641–644, 2009.
5. Пожар В.Э., Пустовойт В.И. Возможности создания новых систем видения на основе акустооптических видеоспектрометров. Радиотехника и электроника, 1996. Т. 41. В. 10. С.1272-1278.

Современные подходы к обработке гиперспектральных аэрокосмических изображений

Бондур В.Г.

«Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга
«АЭРОКОСМОС» Минобрнауки России и РАН, г. Москва

vgbondur@aerocosmos.info

Введение

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является одной из наиболее быстро развивающихся областей космической деятельности. Аэрокосмическая информация применяется в интересах исследования и рационального использования природных ресурсов, охраны окружающей среды, предупреждения и ликвидации последствий природных катастроф и техногенных аварий, метеорологии и климатологии, лесного и сельского хозяйства, транспорта, городского планирования, картографии в интересах фундаментальных наук о Земле и др. [Бондур и др., 2009]. Для решения этих задач наиболее перспективно применение инновационных гиперспектральных методов и технологий. Основной отличительной особенностью гиперспектральных данных является возможность одновременного анализа пространственного распределения и спектральных характеристик наблюдаемых объектов, процессов и явлений [Plaza et al., 2009]. При этом используется «гиперкуб» данных, состоящий из строк и столбцов, формирующих матрицу пространственного распределения яркостей, совместно с третьей координатой, являющейся длиной волны регистрируемого излучения [Gut, 1999; Козодеров, 2012].

В настоящее время широкому применению гиперспектральных изображений для аэрокосмического мониторинга препятствуют отсутствие достаточного количества спутников и воздушных носителей, оборудованных гиперспектрометрами с требуемыми характеристиками, а также сложности, связанные с обработкой и интерпретацией больших потоков информации, формируемой этими приборами. В связи с этим, для эффективного использования гиперспектральных данных, поступающих при аэрокосмическом мониторинге, требуется разработка и применение эффективных методов, технологий, программных и высокопроизводительных технических средств обработки информации.

Особенности обработки гиперспектральных аэрокосмических изображений

При обработке гиперспектральных аэрокосмических изображений выполняется ряд этапов, основными из которых являются [Бондур, Резнев, 2012; Бондур и др., 2009]:

1. Предварительная обработка, включающая радиометрическую коррекцию (устранение искажений за счет неравномерности чувствительности элементов детекторов, учет влияния атмосферы); геометрическую коррекцию

(устранение сдвига, учет кривизны земли; особенностей ландшафта); географическая привязка, синтез цветных и псевдоцветных изображений из канальных изображений;

2. Повышение качества изображений, включая: контрастирование; фильтрацию с использованием различных фильтров; подчеркивание границ; совмещение изображений, полученных в разных спектральных каналах, и т.п.;

3. Формирование спектров для всех пикселей гиперспектральных изображений, их отдельных фрагментов или в пределах выделенных контуров;

4. Тематическая обработка, заключающаяся в: классификации изображений (контролируемой, неконтролируемой) на основе различных подходов: детерминированного, непрерывно-группового, синтаксического, статического, нечеткого, нейрокомпьютерного и др., оптимизации числа используемых спектральных каналов гиперспектральных изображений для решения конкретных задач; выявлении изменений в изображениях для анализа динамических свойств исследуемых объектов, процессов и явлений.

5. Интерпретация гиперспектральных изображений, заключающаяся в выявлении признаков; восстановлении параметров исследуемых элементов изображений; символьном представлении результатов; семантической интерпретации и др.;

6. Формирование временных рядов тематически сегментированных гиперспектральных изображений.

7. Сопоставление результатов обработки разновременных и разнотипных гиперспектральных изображений и экспорт их в ГИС.

8. Анализ результатов обработки и формирование обоснованных рекомендаций для принятия решений.

В настоящее время существует ряд программных комплексов, предназначенных для обработки аэрокосмических изображений, разработанных различными организациями, основными из которых являются: ENVI (EXELIS); ERDAS ErMapper, ERDAS Imaging (Intergraph, ERDAS); GEOMATICA (PCI Geomatics); Аспект-Стат, Шелл, Мультикласс, Динкласс (НИИ «Аэрокосмос»); Сканмэджик, ScanEx Image Processor (НТЦ СканЭкс). Некоторые из них позволяют решать отдельные задачи, связанные с обработкой гиперспектральной информации, формируемой в процессе дистанционного зондирования. Это программное обеспечение функционирует на различных вычислительных средствах с использованием различных операционных систем.

Для повышения эффективности использования гиперспектральных данных, формируемых в процессе аэрокосмического мониторинга, требуется развитие существующих и разработка новых программных и технических средств обработки данных, прежде всего, с целью автоматизации, повышения достоверности и быстродействия анализа больших потоков информации. Важную роль для достижения этих целей играет также выбор и применение соответствующих вычислительных средств.

Современный программный комплекс обработки гиперспектральных аэрокосмических изображений

В настоящее время для обработки больших объемов гиперспектральных аэрокосмических данных в НИИ «АЭРОКОСМОС» разработаны соответствующие методы и создан развитый программный комплекс, который состоит из:

1. Программного обеспечения «Мультикласс» для распознавания по гиперспектральным аэрокосмическим изображениям объектов различных типов на основе анализа их качественных и количественных характеристик, которое обеспечивает:

- распознавание на основе дискриминантных функций при установке весов вручную или в соответствии с кривой ошибок для случаев простых и сложных альтернатив;
- распознавание с использованием кластеризации обучающей выборки;
- многоклассовое распознавание методом минимального риска;
- распознавание с использованием обобщенного «гиперкуба» меньшей размерности, полученного методом разделения смесей;
- определение количественных характеристик исследуемых объектов (например, породного состава проективного покрытия леса и т. п.) с использованием нейронной сети.

2. Программное обеспечение для совместной многопараметрической обработки гиперспектральной информации, получаемой с космических и воздушных средств, обеспечивающее:

- объединение разнородных геопространственных гиперспектральных данных для совместной обработки;
- текстурный анализ данных;
- пространственный спектральный анализ изображений;
- параллельную разветвленную интерактивную и автоматическую многопараметрическую обработку разнородных гиперспектральных данных.

3. Программное обеспечение для распознавания типов объектов путем решения обратных задач ДЗЗ, которое позволяет:

- формировать в требуемом виде входные данные на основе исходных калиброванных гиперспектральных изображений;
- управлять обратными задачами;
- обеспечивать автоматизированное решение обратных задач;
- формировать выходные данные с результатами распознавания типов объектов ДЗЗ.

4. Программное обеспечение для выявления и распознавания типов малоразмерных объектов на основе анализа отдельных областей, позволяющее:

- определять тоновые и спектральные характеристики исследуемой территории по гиперспектральным данным;
- формировать области с одинаковыми тоновыми и спектральными характеристиками;

- выделять области с одинаковыми тоновыми и спектральными характеристиками;
- выделять информативные признаки для выделенных областей;
- распознавать объекты по вычисленным информативным признакам и определять их местоположение.

5. Дополнительное программное обеспечение для повышения степени автоматизации на различных этапах обработки гиперспектральной информации, обеспечивающее:

- автоматическое открытие набора данных;
- автоматическое фрагментирование гиперспектральных данных;
- автоматическое масштабирование набора данных;
- автоматическое геометрическое согласование набора данных;
- расширение реализуемых математических функций;
- управление программным комплексом.

Реализация программного комплекса на супер-ЭВМ

Данный программный комплекс реализован для операционной системы LINUX. При этом обеспечено решение сложной задачи распараллеливания вычислений для обеспечения вычислений на супер-ЭВМ терафлопсного класса [Бондур, Резнев, 2012].

Результаты тестовых измерений на примере использования программного обеспечения распознавания наземных объектов путем решения обратных задач ДЗЗ по гиперспектральным изображениям, полученным с помощью космического гиперспектрометра Hyperion (220 спектральных каналов в диапазоне $\Delta \lambda = 0,4 \dots 2,5$ мкм), установленного на спутнике EO-1, показали следующее. Скорость такой обработки на суперкомпьютере производительностью 1,1 Tflops (12 процессоров, 144 ядра) более чем в 100 раз превышает скорость обработки на персональном компьютере с одним процессором Pentium 4 (3,6 ГГц).

В докладе приводятся примеры обработки гиперспектральных данных с использованием описанного программного комплекса.

Литература

1. Бондур В.Г., Резнев А.А. О применении суперкомпьютеров для обработки потоков аэрокосмических изображений // Материалы 2-й Всероссийской научно-технической конференции «Суперкомпьютерные технологии», Дивноморское, Геленджик. – 2012. С.338-345.
2. Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М: Научный мир, 2009. 692 с., 22 ил.
3. Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е.В., Казанцев О.Ю., Персеев И.В., Щербаков М.В. Обработка данных гиперспектрального аэрокосмического зондирования // Исследование Земли из космоса, 2012, №5, С.3-11.

4. Gut N. Hyperspectral imaging // Spectroscopy. 1999. V.14. №3. P. 28-42.

5. Plaza A., Benediktsson J.A., Boardman J.W., Brazile J., Bruzzone L., Camps-Valls G., Chanussot J., Fauvel M., Gamba P., Gualtieri A., Marconcini M., Tilton J.C., Trianni G. Recent advances in techniques for hyperspectral image processing // Remote Sensing of Environment, 2009, V. 113. P.110–S122.

Современное состояние и перспективы спутникового гиперспектрального атмосферного зондирования

Асмус В.В., Рублев А.Н., Успенский А.Б.
ФГБУ "НИЦ "Планета", Москва
uspensky@planet.iitp.ru

Разработка и применение гиперспектральной аппаратуры и технологий дистанционного атмосферного зондирования – важнейшее направление развития космических наблюдательных систем гидрометеорологического назначения. Определяющим фактором при этом являются требования пользователей спутниковой гидрометеорологической информации, в соответствии с которыми метеорологические спутники должны оперативно поставлять данные о термодинамических параметрах и составе атмосферы с определенными пространственно-временной дискретностью, вертикальным разрешением и уровнем погрешности.

Выходные продукты дистанционного атмосферного зондирования уже в настоящее время существенно дополняют данные наземной наблюдательной сети (аэрологические, синоптические и др.), а в будущем должны стать основными в информационном обеспечении численного прогноза погоды, мониторинга климатических изменений и изучения процессов атмосферной химии. Наибольший приоритет из упомянутых спутниковых информационных продуктов имеют данные температурно-влажностного зондирования атмосферы (ТВЗА), роль которых возрастает в условиях постоянного сокращения наземной сети аэрологических наблюдений.

Технологии получения данных ТВЗА по информации спутниковых зондировщиков (ИК) и микроволнового (МКВ) диапазонов спектра достаточно хорошо отработаны за рубежом и в нашей стране. С середины 80-х годов указанные продукты оперативно производились по данным спутников серии NOAA, Метеор. По уровню погрешности и вертикальному разрешению данные ТВЗА уступают данным аэрологического зондирования, поэтому последние 20 лет теоретически прорабатывались и экспериментально апробировались пути улучшения этих характеристик. Применительно к ИК-измерениям они сводятся к переходу от спутниковой аппаратуры малого спектрального разрешения ($\lambda/\Delta\lambda \approx 50$) с небольшим числом каналов (5-50) к приборам высокого спектрального разрешения типа интерферометра Майкельсона или дифракционного спектрометра ($\lambda/\Delta\lambda \approx 1000$), позволяющим регистрировать квазинепрерывные по λ (λ – длина волны) спектры с большим количеством точек отсчета (несколько тысяч) – гиперспектральным ИК-зондировщикам.

В докладе дано описание гиперспектральных ИК-зондировщиков, которые устанавливаются или планируются к установке на оперативные полярно-орбитальные метеоспутники нового поколения (отечественные и зарубежные). Кратко рассмотрены также гиперспектральные ИК-зондировщики, которые разрабатываются для установки на перспективные

геостационарные метеоспутники. Представлен обзор методов и алгоритмов анализа и тематической обработки измерений указанных зондировщиков, позволяющих выполнять сжатие и моделирование исходных данных, восстанавливать профили температуры, влажности и озона в атмосфере, оценивать содержание малых газовых составляющих, определять температуру подстилающей поверхности, детектировать облачность в поле зрения прибора. Изложение иллюстрируется примерами апробации предложенных алгоритмов тематической обработки на фактических спутниковых данных. Сформулированы задачи, связанные с алгоритмами тематической обработки, которые требуют дополнительных исследований.

Основной недостаток измерений гиперспектральных ИК-зондировщиков – искажающее влияние облачности, что не позволяет получать достоверные продукты ТВЗА в условиях облачности. В связи с этим обсуждаются технология «всепогодного» атмосферного зондирования, основанная на совместной обработке данных ИК- и МКВ-зондировщиков.

Наряду с ИК-зондировщиками, информацию о газовом составе атмосферы (малых газовых составляющих, включая «парниковые» газы) можно получать по данным спутниковых спектрометров высокого спектрального разрешения видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра (работающих в надирном и лимбовом режимах). В докладе представлено описание современных спутниковых спектрометров такого типа, рассмотрены технологии получения информационных продуктов (содержание различных газовых составляющих в атмосфере). Приводятся иллюстративные примеры дистанционного определения общего содержания диоксида углерода в атмосфере по данным спектрометра Sciamachy/Envisat.

Состояние, развитие и применение гиперспектральных технологий в аэрокомплексах и системах воздушной разведки

Молчанов А.С.

1 УНИИ войсковой части 15650, г. Ахтубинск

Современный уровень войн требует новых подходов к решению задачи разведки, основанных на организации глобального мониторинга района проведения мероприятий с полуавтоматическим распознаванием малоразмерных объектов типа «человек» и предметов типов стрелового оружия, различных типов бронетехники, артиллерийских и ракетных систем, с целью планирования операций и организации нанесения ударов по противнику в режиме реального времени.

Данное направление является составной частью геопространственной разведки, которая в США уже оформилась в самостоятельную структуру – «Национальное управление геопространственной разведки». При этом основной задачей является селекция огромного числа хозяйствующих субъектов, число которых может исчисляться миллионами, от боевиков, число которых не превышает тысяч, а группы составляют от нескольких десятков до сотен человек.

Решение этой задачи невозможно без новых подходов, основанных на создании новых интеллектуальных геопространственных информационных систем на базе нового поколения приемных устройств.

В последнее время предлагаются новые подходы к созданию систем мониторинга, основанные на принципиально новых технологиях гиперспектрального мониторинга. В США гиперспектральный мониторинг активно развивается на уровне приоритетной государственной программы более 20 лет и является одним из основных методов сигнатурной разведки. Данные технологии тщательно оберегаются США, а опыт в этом направлении других стран не является значимым. Среди общей глобальной программы внедрения гиперспектральных технологий США выделили в качестве самостоятельной подпрограммы «программу дистанционного распознавания человеческого лица». В настоящее время выполнены работы, показавшие возможность однозначной дифференциации 130 лиц по узкому участку спектра 700 - 1000нм. Главной целью является обеспечить решение задачи георазведки малоразмерных целей в реальном времени и вскрытие объектов по изучению динамики распределения малоразмерных целей.

Гиперспектральный анализ уже активно используется США для проведения видовой технической разведки: поиску техники, поиску мин, вскрытию замаскированных объектов, селекции на поле боя своих и чужих солдат, надувных макетов и боевых образцов военной техники. Базы данных по целям являются предметом большой отдельной работы подразделения сигнатурной разведки США.

В настоящее время маскировка военных объектов является одной из направлений повышения эффективности оружия и возможность вскрытия такой маскировки – одна из главных задач гиперспектральных средств разведки.

Практическое применение гиперспектральных систем показало способность обнаруживать маскированные объекты, замаскированные самыми современными средствами маскировки.

Особенностью гиперспектральной аппаратуры является необходимость бортовой обработки данных в реальном времени на основе современных достижений микроэлектроники.

Для применения в дневных условиях оптимально использование диапазона 0,4 - 1 мкм, а для ночных условий оптимально использование микроболометров в диапазоне 7 - 14 мкм.

Одной из основных проблем гиперспектрометрии является отработка алгоритмов и создание программного обеспечения для автоматического обнаружения и селекции целей. В процессе испытаний и эксплуатации банк данных о типовых целях и фонах должен накапливаться.

В последнее время актуальной задачей для всех вооруженных сил является создание аэрокомплексов и систем на основе гиперспектральных технологий, которые бы позволяли с высокой вероятностью вскрывать объекты на фоне подстилающей поверхности.

Основные направления исследований по созданию технологий обработки данных гиперспектральной съемки Земли

Ахметов Р.Н., Стратилатов Н.Р., Юдаков А.А.
ФГУБ «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

Везенов В.И., Еремеев В.В.,

Филиал ФГУБ «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр», г. Рязань

foton@rsreu.ru

Одним из актуальных направлений в развитии систем дистанционного зондирования Земли сегодня является создание спутниковой гиперспектральной аппаратуры и технологий обработки получаемой с помощью нее информации. Впервые в отечественной практике подобная аппаратура была установлена на КА «Канопус-В». В настоящее время активно ведется подготовка наземных средств обработки информации от гиперспектральной аппаратуры (ГСА), которая устанавливается на КА «Ресурс-П» (разработчик ГСА – ОАО Красногорский завод им. С.А. Зверева) (КМЗ), разработчики наземных средств обработки информации ГСА – ФГУП «ЦСКБ-Прогресс» и его филиал ОКБ «Спектр», ОАО КМЗ, Рязанский государственный радиотехнический университет). В докладе представлены два направления работ по созданию наземных средств обработки информации от ГСА.

Первое направление связано с разработкой новых методов и подходов по автоматизации процессов сегментации и классификации объектов наблюдаемой сцены. При решении этой задачи ГСА предоставляет уникальную возможность оперировать не только пространственно-яркостными признаками, но и спектральными характеристиками, которые несут ценную информацию о физико-химических свойствах наблюдаемых объектов. Общая технологическая схема решения задачи классификации объектов включает: на первом этапе кластеризацию объектов; на втором этапе – сопоставление выделенных кластеров с набором эталонных спектральных характеристик, содержащихся в базе данных; на третьем этапе – принятие решения об отнесении каждого элемента изображения к тому или иному классу объектов.

Второе направление работ связано с созданием методов комплексирования данных как от собственно ГСА, так и совмещения информации от ГСА и других съемочных систем. Основная цель процесса комплексирования – это получение одного или нескольких изображений, на которых все объекты наблюдаемой сцены отображаются с повышенной четкостью. В докладе рассматривается решение этой задачи в нескольких постановках. Во-первых, представлен алгоритм комплексирования спектральных каналов ГСА, в которых объекты наблюдаемой сцены отображаются совершенно по-разному. В результате при интегрировании ряда каналов отдельные объекты существенно теряют четкость представления. Предложены технологии комплексирования каналов ГСА, основанные на учете уникальных свойств объектов наблюдаемой сцены в каждом из спектральных

диапазонов. Во-вторых, представлена технология комплексирования информации от ГСА, имеющая низкое пространственное, но высокое спектральное разрешение, с панхроматической или спектральной информацией от съемочных систем с многократно лучшим пространственным разрешением. Эта технология позволила в результате комплексирования указанных данных получить новые гиперспектральные изображения, имеющие высокие и пространственное и спектральное разрешение.

Доклад иллюстрируется конкретными результатами, полученными с использованием натурной информации с системы гиперспектральной съемки космического базирования Hyperion (США) и авиационных датчиков AVIRIS, ProSpecTir-V (США), а также видеоданных, предоставленных ОАО КМЗ.

Работы ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» по созданию гиперспектральных приборов дистанционного зондирования

Архипов С.А., Ляхов А.Ю., Тарасов А.П.
ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»
arhipof@zenit-kmz.ru

Ретроспективный анализ более чем 60-летнего опыта ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» по созданию космической и авиационной аппаратуры дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяет выделить в мировом процессе развития систем ДЗЗ, характерные декады, наименование и характеристика основного содержания которых представлены в таблице.

Годы	Наименование декады	Изделия ОАО КМЗ	Содержание
60-70	«Пионерская»	АФА-39, АФА-Е1	Обоснование и практическая реализация получения изображений Земли из космоса
70-80	«Фотографическая»	Жемчуг, Фтор, Природа	Создание и эксплуатация на базе оптико-фотографической аппаратуры космических комплексов космической разведки и исследования природных ресурсов Земли
80-90	«Цифровая»	Родонит	Создание оптико-электронной аппаратуры наблюдения Земли, с использованием многоэлементных фоточувствительных приборов с зарядовой связью (ПЗС)
90-00	«Метрологическая»	Гамма, Геотон	Осознание и развитие технологий ДЗЗ как измерительных процессов
00-10	«Глобализация и интеграция»	ГСА, ИКФС	Осознание и развитие технологий ДЗЗ, как инструмента общечеловеческого глобального контроля Земли
с 2010	«Прогнозные знания»	ГСА, ИКФС, ШМАСР	Интеграция информации о Земле, добывание из накопленных данных новых знаний и прогнозирование развития процессов Земли, как системы

Предложенное разделение достаточно условно (например, в США первые цифровые снимки были получены аппаратурой MSS со спутника Landsat еще в 1972 году, в те же годы Красногорским заводом создана телевизионная аппаратура «Изумруд», которая эксплуатировалась в составе космического комплекса «Алмаз»).

Начиная с 80-х годов, в связи с резким ростом возможностей вычислительной техники и появлением фотоприемных устройств на ПЗС, расширением рабочих спектральных диапазонов наблюдательных приборов вплоть до дальнего ИК, происходит смена парадигмы «классического фотоаппарата», как аналога человеческого глаза, на парадигму «цифровой

съемочной системы» (ЦСС). В состав ЦСС кроме оптики и фотоприемного устройства входит программное обеспечение (база данных), аккумулирующее априорную информацию о характеристиках объекта съемки.

Цель этой новой парадигмы – получить адекватную информацию об объектах съемки, «увидеть мир реальных излучений», а не копировать, повторять «видение» человеческого глаза. С такой общей точки зрения появление видеоспектрометров – вполне закономерное явление.

Видеоспектрометрами (гиперспектрометрами) принято называть оптико-электронные приборы, регистрирующие в каждом пикселе изображения спектр изучения, т.е. приборы, одновременно реализующие функции цифрового фотоаппарата и спектрометра.

Первые предложения Красногорского завода по созданию видеоспектрометра космического применения «ЭКОС» были разработаны и направлены нашему традиционному Заказчику ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» еще в начале 90-х. Первый Красногорский авиационный бортовой видеоспектрометр (БВС) «Сокол-ГЦП» был создан нашим предприятием в 2005 году по заказу ФГУП «Госцентр «Природа» в рамках Федеральной программы по борьбе с наркотиками. Необходимо заметить, что первый отечественный видеоспектрометр был разработан в ЛИТМО (К.Н. Чиков) еще в конце 80-х. Красногорский БВС «Сокол-ГЦП» отличают повышенные радиометрические и фотограмметрические характеристики, что и определило его успешное применение в классе задач тонкой идентификации растительности – выделение посадок конопли в полях сельскохозяйственных культур.

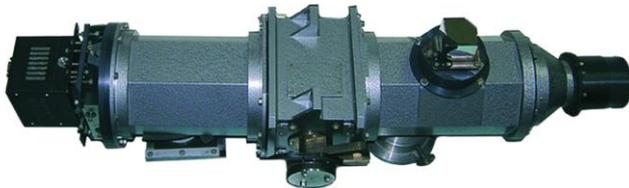


Рис. 1. БВС «Сокол-ГЦП»

Сегодня Красногорский завод готов выполнить ОКР по созданию авиационного съемочного комплекса (на базе БВС «Сокол-ГЦП» и крупноформатной цифровой авиационной камеры АК-115), который обеспечит эффективные решения целевых тематических задач дистанционного зондирования Земли потенциальных Заказчиков.



Рис. 2. Цифровая камера АК-115

Решение о включении гиперспектральной съемочной аппаратуры (ГСА-РП) в состав космического комплекса (КК) «Ресурс-П» было принято Роскосмосом в 2008 году. ОКР по созданию ГСА-РП Красногорский завод завершил в 2012 году поставкой опытного образца и проведением полного цикла автономных, комплексных и ресурсных испытаний. Система приема и преобразования информации для ГСА-РП разработана нашим традиционным смежником – научно-производственным предприятием «ОПТЭКС» (А.И. Бакланов).

В ходе разработки ГСА-РП был проведен анализ альтернативных оптических схем на основе дисперсионных устройств (решетчатые, фильтровые, призмные) и интерферометров (Майкельсона и бокового сдвига) для различных способов съемки (pushbroom, whiskbroom, windowing, staring). При прочих равных условиях гиперспектральной съемки с фотоприемными устройствами, в которых собственные шумы малы в сравнении фотонным шумом, известные преимущества (Фелжета, Жакино, Конна) интерферометров по сравнению с дисперсионными устройствами по критерию отношения сигнал/шум исчезают. Среди дисперсионных устройств было выбрано призмное устройство, которое позволяет реализовывать заданные требования технического задания (число каналов, угол поля зрения, отношение сигнал/фон) на едином входном зрачке.



Рис. 3. ГСА-РП для КК «Ресурс-П»

Сегодня Красногорский завод предлагает выполнить ОКР по созданию гиперспектральной съемочной аппаратуры космического применения с расширенным спектральным диапазоном от 0,4 до 2,5 мкм.

Наше предприятие может гордиться тем, что мы приняли деятельное участие совместно с выдающимся предприятием ракетно-космического комплекса ФГУП «Центр-Келдыша» (Ф.С. Завелевич, Ю.М. Головин) и МГТУ им. Н.Э.Баумана (А.С. Романовский) в создании уникального отечественного зондировщика атмосферы ИКФС-2, который также можно отнести к классу гиперспектральных приборов. Проект начался еще в конце 90-х с работ ВНЦ ГОИ им. С.И. Вавилова (Г.Г. Горбунов), ФГУП «Центр-Келдыша» (Ф.С. Завелевич) и ИКИ РАН (Б.Е. Мошкин). Опытный образец ИКФС-2 прошел

полных цикл наземных испытаний и устанавливается на КК «Метеор-2» ОАО «Корпорация ВНИИЭМ».



Рис.4. Зондировщик атмосферы Земли ИКФС-2

В настоящее время в сложившейся кооперации ведутся работы по созданию зондировщика атмосферы ИКФС-3, который планируется установить на космический комплекс «Метеор-МП».

С начала 2000-х Красногорский завод совместно с МВТУ принимает участие в создании современных средств радиационной, химической и биологической разведки (РХБР) в интересах МО РФ. Талантливые идеи и практические разработки А.Н. Морозова (МГТУ им. Н.Э.Баумана), заложенные в схемотехнику этих приборов, определяют их достойные тактико-технические характеристики, находящиеся на уровне лучших зарубежных аналогов, востребованность и эффективность применения в решении боевых задач.



Рис. 4. Прибор химической разведки ПХРДД-2С

Перспективы развития приборов РХБР лежат на пути применения многоэлементных приемников изображения, повышения пространственного разрешения и дальности обнаружения заданных веществ.

Качество информации ДЗЗ, получаемой съемочной аппаратурой значительной степени определяется корректностью и точностью аттестации ее фотограмметрических и радиометрических характеристик. Эти характеристики выполняют функцию «универсального языка», связывающего информацию ДЗЗ, полученную в различное время или различными КК ДЗЗ, в различных спектральных диапазонах. Для гиперспектральной аппаратуры радиометрическая калибровка имеет принципиальное значение, т.к. погрешность прослеживаемости градуировочных характеристик аппаратуры к первичному эталону спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ)

непосредственно определяют точность ее спектрального разрешения. Гиперспектральная аппаратура Красногорского завода проходит обязательную радиометрическую и фотограмметрическую калибровки, по результатам которых заполняются соответствующие формуляры.

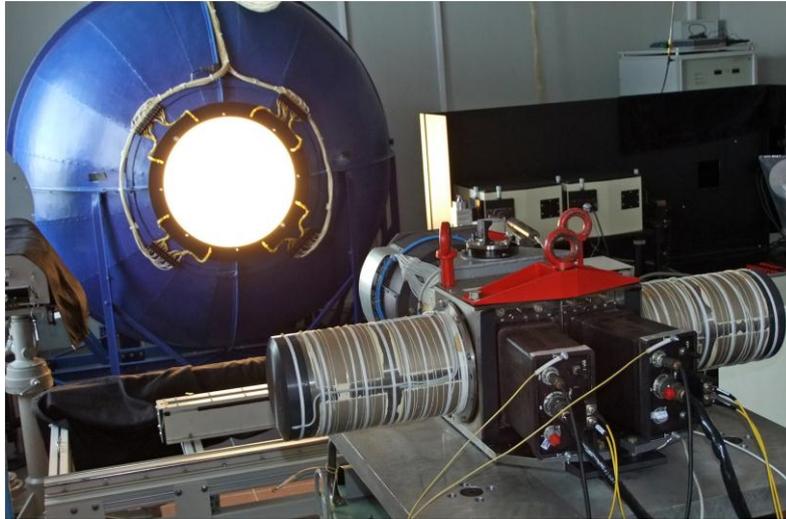


Рис. 5. ГСА-РП на государственном первичном эталоне единиц СПЭЯ ВНИИОФИ.

Важнейшая составляющая гиперспектральной съемочной аппаратуры – наземное программно-методическое обеспечение (ПМО), предназначенное для контроля состояния и оптимальной настройки аппаратуры в процессе эксплуатации, обработки гиперспектральной информации, пополнения базы данных коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) подстилающей поверхности и базы данных по спектральному пропусканию атмосферы.

Методики и алгоритмы ПМО для ГСА-РП разрабатывались Красногорским заводом совместно со специалистами ВКА им. А.Ф. Можайского и ИФА им. А.М. Обухова РАН. На основе созданных методик и алгоритмов специалисты ОКБ «Спектр» разработали и внедрили в НЦ ОМЗ комплекс ПМО ГСА-РП.

При планировании съемки ГСА-РП в ПМО ГСА-РП предусмотрены возможности адаптации параметров режима съемки к условиям съемки:

- оптимизация параметров экспонирования и спектрального разрешения, с учетом метеопрогноза и ожидаемого диапазона КСЯ подстилающей поверхности;
- возможность изменения спектрального диапазона съемки и спектрального разрешения, исходя из решаемой задачи;
- возможность изменения пространственного разрешения, исходя из решаемой задачи.

В эксплуатации ПМО ГСА-РП обеспечивает:

- контроль стабильности и, при необходимости, коррекции чувствительности и положения шкалы длин волн;

- коррекцию фотограмметрических параметров для фактического текущего значения температуры в процессе эксплуатации ГСА.

ПМО ГСА-РП обеспечивает обработку гиперспектральной информации, после её восстановления, в т.ч.:

- относительную коррекцию неоднородности чувствительности;
- абсолютизацию данных - расчёт СПЭЯ на верхней границе атмосферы;
- спектральную и пространственную сшивку гиперкуба данных в каналах ВД1 и ВД2;
- «линеаризацию» шкалы длин волн;
- вычисление оптических характеристик атмосферы по метеоданным, полученным на момент съёмки и расчёт СПЭЯ на уровне подстилающей поверхности;
- пополнение базы данных и развитие модели атмосферы;
- пополнение базы данных и развитие модели КСЯ подстилающей поверхности.

ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» активно участвует в развитии отечественной гиперспектральной техники и предлагает потенциальным заказчикам и партнерам: выполнение НИОКР по созданию новых классов видеоспектрометров с повышенными тактико-техническими характеристиками, разработкам ПМО и баз данных, проведение исследований по целевому применению гиперспектральных средств.

Секция 1

Гиперспектральные приборы с микрозеркальной матрицей и дисперсионные монохроматоры изображений

Гулис И. М., Воропай Е. С., Купреев А. Г., Костюкевич А. Г.
Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь
gulis@bsu.by

Возрастающая востребованность высокоинформативных методов спектроскопии с пространственным разрешением сделала актуальной разработку новых подходов к созданию гиперспектрометров и монохроматоров изображения. Традиционные методы, основанные на механическом сканировании исследуемого объекта входной щелью спектрометра, либо на регистрации набора квазимонохроматических изображений через переключаемые спектральные фильтры, сопряжены с рядом фундаментальных и технических ограничений (механические системы сканирования и переключения фильтров, ограничения по светосиле, спектральному либо пространственному разрешению, большое время формирования гиперспектра). Предложен ряд подходов к построению гиперспектральных приборов и монохроматоров изображения, обладающих улучшенными аналитическими либо технико-операционными характеристиками.

Для построения гиперспектрометров с реконфигурируемой апертурой, позволяющих как регистрировать полный спектральный гиперкуб, так и работать в мультиобъектном режиме, перспективным является использование пространственных модуляторов света с микрозеркальными матрицами (МЗМ) в качестве системы управления световыми потоками. Это обусловлено тем, что элементы МЗМ технически долговечны, обладают малыми размерами, высокой скоростью переключения, спектрально неселективны. Разработан оригинальный оптический дизайн светосильного гиперспектрометра с МЗМ в качестве реконфигурируемой входной апертуры. На базе дизайна создан прибор с фокусным расстоянием 250 мм и относительным отверстием 1:5, обеспечивающий регистрацию в спектральном диапазоне 400÷900 нм (с разделением на два поддиапазона 400÷670 нм и 650÷900 нм, переключение между которыми осуществляется поворотом дифракционной решетки) с разрешением до 0,8 нм. Прибор включает наблюдательный и спектроскопический каналы, позволяющие практически в реальном времени наблюдать исследуемый объект и регистрировать спектральную информацию не только от поля в целом, но и от отдельных его фрагментов в интерактивном режиме. Характеристики позволяют применять гиперспектрометр для решения широкого круга задач современной мультиобъектной спектроскопии и гиперспектропии: спектрально-координатного анализа объектов (документов, образцов продукции), ландшафтов, медицинской диагностики, дистанционного мониторинга земной поверхности и прочих.

Другой подход к проблеме спектральной регистрации с пространственным разрешением – разработка монохроматоров изображения,

позволяющих регистрировать набор квазимонохроматических изображений исследуемых объектов в некотором спектральном диапазоне. Такой подход применим, прежде всего, там, где востребована высокая скорость регистрации и функциональная гибкость – это значительная часть современных рутинных и полевых аналитических исследований. Реализация подхода требует нахождения принципиальных и схемных решений, в которых минимизируется уровень aberrаций для всех точек входного поля при соблюдении плоскостности поля изображения, при этом, для всех длин волн рабочего диапазона и при соблюдении требования достаточно высокой светосилы (уровень требований, существенно превышающий предъявляемый к оптике обычных спектрометров).

Предложен метод регистрации мультizonальных снимков с варьируемым спектральным разрешением и выбором спектральных полос, основанный на использовании дисперсионного двойного монохроматора с вычитанием дисперсии в режиме обратного прохождения. Принцип работы прибора основан на снятии «спектрального размытия» диспергированного после прохождения первого монохроматора квазимонохроматического изображения за счет прохождения излучения через второй монохроматор, работающий в режиме вычитания дисперсии. При этом, для обеспечения строгой идентичности параметров двух монохроматоров и упрощения конструкции прибора, функцию второго монохроматора выполняет та же оптическая схема, которая работает как первый монохроматор, но в режиме обратного прохождения, обеспечиваемого уголковым отражателем. При этом как входная апертура прибора, так и выходная, в которой размещается ПЗС-матрица, разнесены в направлении, перпендикулярном плоскости дисперсии.

Преимуществами прибора являются возможность одномоментной регистрации всей картины входного поля в узком спектральном диапазоне; произвольный выбор спектрального положения выделяемой полосы в пределах рабочего диапазона; абберационно-лимитированное (а не определяемое шириной входной щели, как имеет место в традиционных гиперспектрометрах) пространственное разрешение; высокий контраст по сравнению с системами на базе перестраиваемых или сменяемых полосовых фильтров; высокое светопропускание, ограниченное практически только эффективностью дифракции решетки при относительно большой числовой апертуре; основанный на использовании простых оптических элементов дизайн, обеспечивающий компактность, механическую стабильность, надежность. Схемное решение прибора обеспечивает рабочий спектральный диапазон 400÷800 нм; спектральное разрешение 10 нм; относительное отверстие 1:7. С использованием разработанного модуля для дискретной перестройки 40 монохроматических изображений через $\Delta\lambda=10-15$ нм могут регистрироваться за время порядка 45 с. Разработанная система двойного монохроматора изображения с вычитанием дисперсии перспективна для использования в системах авиационно-космического дистанционного зондирования.

Еще одно разработанное решение основано на схеме, в которой коллиматорный объектив дисперсионного спектрометра выполняет функции

входного объектива системы формирования изображения объекта; изображение формируется вблизи диспергирующего элемента, а затем передается камерным и изображающим объективами на двумерный фотоприемник, таким образом, что картина входного поля наблюдается через узкую щель монохроматора. В этом заключается принципиальное отличие предложенной схемы от «традиционных» дисперсионных мульти- и гиперспектрометров, где функции проецирования исследуемого объекта или поверхности на входную апертуру спектрометра выполняет предварительная оптическая система. Разработанная на основе предложенного принципа схема позволяет обойти ограничение традиционных гиперспектральных измерений, обусловленное жесткой связью между пространственным и спектральным разрешениями. В ней же пространственное разрешение лимитировано абберациями оптической системы, а светопропускание и спектральное разрешение определяются ширинами щелей монохроматора, как в классическом спектральном приборе.

Анализ рассмотренной схемы показал, что существенным фактором, ограничивающим пространственное разрешение, достигаемое при регистрации квазимонохроматических изображений, являются абберации, вносимые дифракционной решеткой. Получены аналитические выражения для поперечных аббераций дифракционной решетки как функции актуальных параметров оптической схемы монохроматора. Теоретические расчеты находятся в хорошем соответствии с результатами компьютерного моделирования. Полученные функциональные зависимости аббераций позволили оптимизировать оптическую схему дисперсионного монохроматора изображения. Создан макетный образец прибора, экспериментально получены квазимонохроматические изображения тестовых объектов со спектральным разрешением порядка 10 нм.

Гиперспектральные регистрирующие системы видимого и ближнего ИК диапазонов на основе акустооптических фильтров

Мазур М.М., Шорин В.Н., Епихин В.М., Судденко Ю.А., Кияченко Ю.Ф.,
Мазур Л.И., Пальцев Л.Л.

ВНИИ физико-технических и радиотехнических измерений,
Московская область пос. Менделеево
s-mmazur@mail.ru

Спектральная фильтрация изображений широко используется для обнаружения и идентификации объектов и для визуализации структуры объектов. Для тех задач, в которых полоса пропускания должна допускать перемещение по спектральному диапазону, используют перестраиваемые фильтры. Акустооптические (АО) фильтры обеспечивают высокое быстродействие, пропускание, спектральное разрешение и широкий спектральный диапазон [1-5].

Блок-схема акустооптических спектрометров изображения видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов приведена на рис. 1. Основными узлами спектрометров являются: входной объектив, определяющий поле зрения спектрометра изображения и формирующий необходимые параметры светового пучка в монохроматоре; акустооптический монохроматор изображений, производящий спектральную селекцию излучения; выходной объектив, создающий изображение анализируемого объекта на фотоприемной матрице; чувствительная монохромная видеокамера. С целью унификации в обоих спектрометрах, разработанных на видимый и на ближний ИК диапазоны, используются однотипные входные и выходные объективы, отличающиеся размером промежуточной диафрагмы, задающей угловое поле световых пучков в монохроматоре. Основное отличие спектрометров заключается в конструкции акустооптических монохроматоров. В АО спектрометре видимого диапазона применен двойной АО монохроматор, а в АО спектрометре ИК диапазона - одинарный.

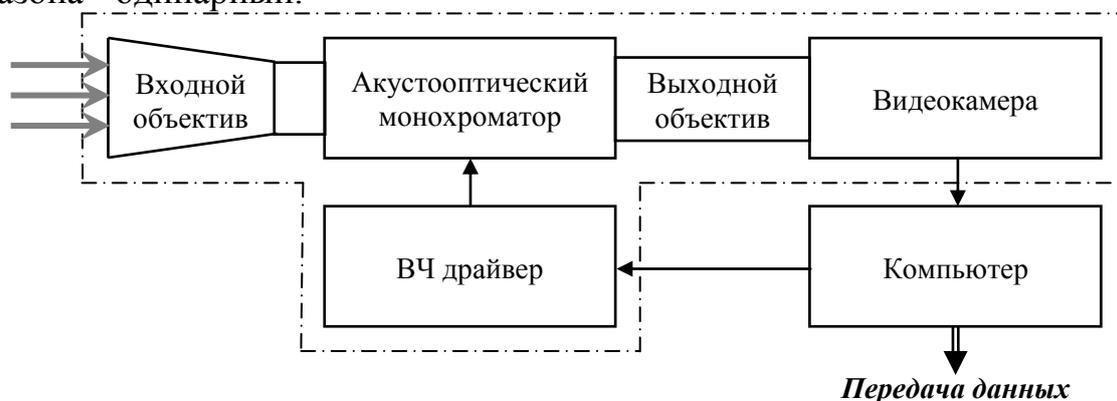


Рис.1. Блок-схема спектрометров изображений видимого и ИК диапазонов

В качестве входного объектива используется специально разработанная конструкция в виде телескопа Кеплера. Входной телескопический объектив

необходим для того, чтобы согласовать угловое поле зрения спектрометра и угловую апертуру акустооптического монохроматора. Угловое поле зрения обоих спектрометров изображения составляет 8° . При этом угловая апертура монохроматора видимого диапазона примерно 3° , а монохроматора ИК диапазона - примерно 5° . Входная часть телескопа выполнена в виде триплета, а выходная – в виде дублета. Выходной объектив спектрометра - также дублет, идентичный выходной части телескопа.

В качестве монохроматора акустооптического спектрометра изображений видимого диапазона (рис. 2) используется двойной акустооптический монохроматор с неколлинеарными акустооптическими ячейками из парателлурита и симметричной схемой расположения акустооптических ячеек [2, 3]. В этой схеме при передаче изображений удаленных объектов монохроматор работает в параллельных лучах. Схема (а) при условии работы в параллельных пучках обеспечивает отсутствие искажений передаваемого через монохроматор изображения [2,6]. Это очень важное достоинство двойного монохроматора, т.к. получаемое изображение не требует дополнительной обработки для устранения хроматических и геометрических aberrаций. Выбранная схема двойного монохроматора влечет за собой определенные технологические сложности. Акустооптические ячейки такого монохроматора должны быть с высокой степенью идентичными, что возможно только при применении специальной технологии обработки кристаллической ячейки [7].

Схема одиночного монохроматора (б) значительно проще, требования к обработке ячейки не столь высокие, а сам такой монохроматор дешевле. Кроме того, и в схеме с одной АО ячейкой возможна существенная компенсация спектрального дрейфа дифрагированного светового пучка за счет соответствующей ориентации выходной грани [8].

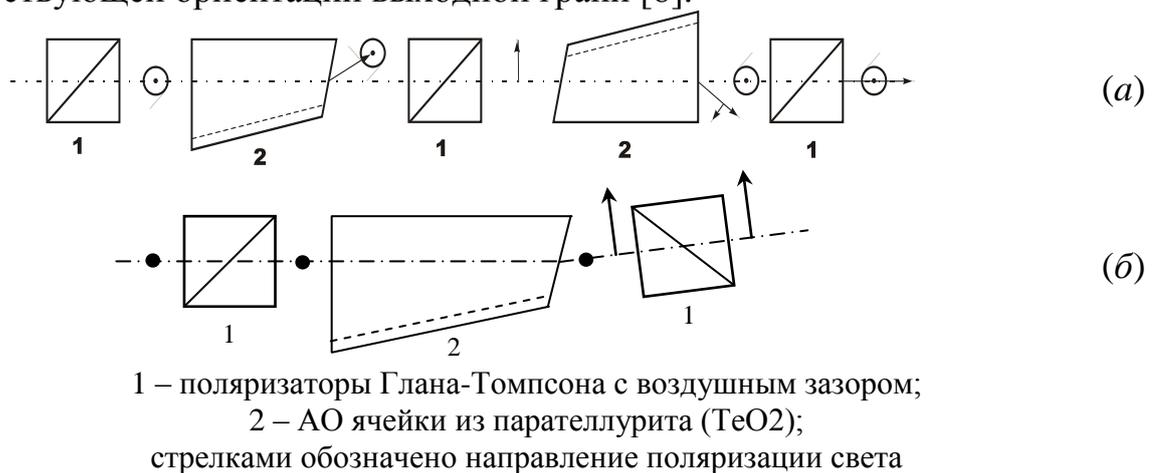


Рис. 2. Оптические схемы акустооптических монохроматоров:
(а) - двухкристального монохроматора видимого диапазона,
(б) - однокристального монохроматора ИК диапазона

Измерение пространственного разрешения АО спектрометров изображения проводилось с помощью транспаранта с изображением мира,

размещенной на расстояние около 6 м от приемного объектива. Получены следующие результаты.

1. Исследования формирующей оптики (входной телескоп и выходной объектив спектрометра), показали, что во всем рабочем спектральном диапазоне (0,44 – 1,1) мкм пространственное разрешение практически (с точностью до десяти процентов) равно дифракционному.

2. Для видеоспектрометра видимого диапазона, содержащего двойной монохроматор измерения проводились на длине волны 633 нм. Число одновременно измеряемых пространственно разделенных участков изображения составило не менее 700×700.

3. Для видеоспектрометра ИК спектра, содержащего одиночный монохроматор, измерения проводились на длине волны 1 мкм. Число одновременно измеряемых пространственно разделенных участков изображения составило не менее 500×500. Величина пространственного разрешения не изотропна в плоскости изображения: в плоскости акустооптической дифракции разрешение в 2,3 раза, а в ортогональной плоскости в 1,4 раза хуже дифракционного. Таким образом, анизотропия разрешения составляет 1,6.

4. Спектральное разрешение видеоспектрометра видимого диапазона на длине волны 633 нм составило 2,5 нм, а спектральное разрешение видеоспектрометра ИК диапазона на длине волны 1064 нм составило 2,1 нм.

Литература

1. Ю.К. Калинин, Л.Я. Стаценко. Использование акустооптических фильтров для фильтрации изображения. ЖТФ, 1989, т. 59, № 9, стр. 153 – 156.

2. В.Э. Пожар, В.И. Пустовойт, М.М. Мазур, В.Н. Шорин. Патент РФ 2258206 от 16.01.2004. Акустооптический видеомонохроматор для фильтрации оптических изображений.

3. М.М. Мазур, В.Э. Пожар, В.И. Пустовойт, В.Н. Шорин. Двойные акустооптические монохроматоры. Успехи современной радиоэлектроники, № 10, с. 19-30, 2006

4. В.Н. Жогун, М.М. Мазур, В.Э. Пожар, В.И. Пустовойт, В.Н. Шорин. Микровидеоспектрометры на основе акустооптических фильтров. В кн.: «Акустооптические, акустические и рентгеноспектральные методы и средства измерений в науке и технике» Труды ВНИИФТРИ, 2005, в.48 (140), с. 27-34.

5. V.I.Pustovoit, V.E.Pozar, M.M.Mazur, V.N.Shorin, I.B.Kutuza, A.V.Percik. Double-AOTF spectral imaging system. In “Acousto-optics and Photoacoustics”, A.Slivinski, R.Reibold, V.B.Voloshinov, Eds. Proc. SPIE, v.5953, p.200-203, 2005.

6. Мачихин А.С., Пожар В.Э. Искажения изображения возникающее при передаче через двойной акустооптический монохроматор. Электромагнитные волны электронные системы, 2009, Т.14. №11. С.63-68.

7. М.М. Мазур. Критерий идентичности акустооптических ячеек для двойных АО монохроматоров. В кн.: «Акустооптические, акустические и рентгеноспектральные методы и средства измерений в науке и технике». Труды ВНИИФТРИ, 2005, в.48 (140), с.48-52.

8. В.М. Епихин, Ю.К. Калинин. Компенсация спектрального дрейфа угла дифракции неколлинеарного акустооптического фильтра. ЖТФ, 1989, т. 59, № 2, стр. 160 – 163.

Методы оптимизации гиперспектральных измерений с использованием акустооптических фильтров

Пожар В.Э., Пустовойт В.И., Табачкова К.И.
НТЦ уникального приборостроения РАН,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
vitold-pozhar@yandex.ru

По мере развития спектральных систем дистанционного зондирования от спектральной съемки к гиперспектральным системам происходило увеличение числа спектральных каналов и сужение полосы пропускания канала. Это обеспечивает все большее количество спектральной информации с все большим спектральным разрешением. Однако эта тенденция имеет и обратную (негативную) сторону. Во-первых, по мере сужения полосы пропускания канала уменьшается и регистрируемый световой поток, что ведет к снижению отношения сигнал/шум. Этот фактор особенно существенен для задач мониторинга с борта мобильных носителей, например, летательных аппаратов, когда время накопления сигнала ограничено временем пролета. Другой негативный фактор – увеличение времени перестройки по спектру, минимальная величина которого $t_{\min} \sim N\tau_{tr}$, где τ_{tr} – время пробега ультразвука по кристаллу, N – число спектральных каналов.

Таким образом, при фиксированном времени наблюдения увеличение числа каналов ведет к снижению регистрируемого сигнала N^{-2} . Очевидно также, что если в исходных многозональных системах все каналы были одинаково значимыми, то для гиперспектральных – каналы информативно неравноценны. В соответствии с этим для гиперспектральных систем важной является задача выработки эффективных методов регистрации гиперспектральной информации.

Наиболее очевидный подход – регистрация только тех спектральных каналов, которые важны для решаемой задачи. Он может быть без труда реализован с помощью акустооптических (АО) фильтров, допускающих произвольный спектральный доступ за фиксированное время τ_{tr} . При числе информативных признаков порядка десятка экономия времени составит один-два порядка. Важно также, что решаемая задача может быть изменена или скорректирована в реальном времени, что позволяет создавать адаптивные алгоритмы анализа [1], но требует разработки методов нахождения оптимальных линий и алгоритмов [2].

Другие подходы, которые пока никак не задействованы, связаны с синтезом оптимальной аппаратной функции АО фильтров. В простейшем случае это может быть многооконная функция, используемая в корреляционной спектроскопии для детектирования объектов, имеющих несколько спектральных особенностей. Увеличение чувствительности и избирательности пропорционально числу окон. Такие функции могут быть реализованы в АО фильтрах путем одновременного возбуждения нескольких частот ультразвука [3].

Еще один пример синтеза аппаратной функции заключается в расширении ширины окна. Это необходимо для задач регистрации люминесценции, интервал свечения которой составляет 10-50 нм. Управляемое расширение полосы может быть достигнуто на высокоразрешающем АО фильтре путем быстрой линейной частотной модуляции (ЛЧМ) ультразвука. Расчет показывает возможность сохранения при расширении полосы высокого коэффициента пропускания ($T=100\%$) [4], что обеспечивает рост чувствительности приема пропорционально расширению полосы регистрации. Такие фильтры уже прошли экспериментальную проверку и могут быть использованы в составе систем, в том числе мобильных.

Таким образом, программно-управляемые АО фильтры с синтезируемой аппаратной функцией и/или с гибко меняющимся алгоритмом выборочной регистрации спектра открывают новые возможности в повышении чувствительности, избирательности и быстродействия гиперспектральных систем.

Литература

1. В.Э. Пожар, В.И. Пустовойт. Об оптимальном алгоритме спектрального химического анализа с помощью акустооптических спектрометров. Электромагнитные волны и электронные системы, 1997, т.2, №4, с.26-30.
2. В.Э. Пожар, А.В. Фадеев. Особенности использования акустооптических спектрометров в задачах мониторинга атмосферного воздуха, Успехи современной радиоэлектроники, 2008, в.12, с.53-59
3. В.И. Пустовойт, В.Э. Пожар. Акустооптические спектральные устройства: состояние и перспективы. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, серия «Приборостроение», специальный выпуск «Современные проблемы оптоэлектроники», 2011, с. 6-15.
4. В.И. Пустовойт, К.И. Табачкова, В.Э. Пожар. Об эффективности коллинеарной дифракции на линейно частотно-модулированной акустической волне. Там же, с.228-234.

Развитие космической гиперспектральной аппаратуры за рубежом

Ахметьянов В.Р., Николенко А.А.

Московский физико-технический институт (государственный университет),
Московская область, г. Долгопрудный
zinval@list.ru

Терентьева В.В.

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург
victoria-soul@rambler.ru

Космические гиперспектральные технологии начали развиваться за рубежом с середины 80-х годов благодаря техническому прогрессу в области микроэлектроники, фотоприемников и вычислительной техники.

Агентство противоракетной обороны США с конца 1980-х гг. руководило созданием пяти спектрометрических камер. Эти оптоэлектронные камеры входили в комплект UVISI (Ultraviolet and Visible Imagers and Spectrographic Imagers), являвшийся одной из полезных нагрузок экспериментального искусственного спутника Земли (ИСЗ) MSX (Midcourse Space Experiment) военного назначения. Данные камеры были первыми гиперспектральными инструментами в космосе, осуществлявшими съемку земной поверхности с низким (около 800 м) пространственным и очень высоким спектральным разрешением (до 0,5 нм).

Это же агентство с 1990 г. в рамках программы MSTI (Miniature Space Technology Investigation) обеспечило создание гиперспектральной камеры, которая эксплуатировалась в период с 1996 по 1997 годы. Работы по разработке и производству гиперспектральной аппаратуры проводились компанией SAIC (Shanghai Automotive Industry Corporation). В декабре 1997 г. ИСЗ MSTI-3 был сведен с орбиты и вошел в плотные слои атмосферы.

По заказу Научно-исследовательского управления и лаборатории министерства Военно-морских сил США в соответствии с программой HRST (Hyperspectral Remote Sensing Technology) в рамках проекта NEMO (Navy Earth Map Observer) разработан экспериментальный ИСЗ, оснащаемый гиперспектральной камерой COIS (Coastal Ocean Imaging Spectrometer). В аппаратуре использованы два дифракционных спектрометра, один из которых работает в спектральном диапазоне 0,4 – 1,0 мкм, а другой - 1,0 - 2,5 мкм.

Директорат космических экспериментов научно-исследовательской лаборатории Военно-воздушных сил более 10 лет проводит работы по использованию гиперспектральных технологий на экспериментальных спутниках военного назначения. В результате этих работ с 1990 по 2001 гг. созданы гиперспектральные камеры Warfighter-1 и FTHSI.

Центр космических полетов им. Годдарда активно участвовал в создании гиперспектральных камер LEISA (Linear Etalon Imaging Spectral Array) и HSI (Hyper-Spectral Imager) для ИСЗ LEWIS. С 2000 г. находятся на орбите и эксплуатируются гиперспектральные камеры AC и HYPERION, размещенные

на ИСЗ EO-1 (Earth Observing One). Данные камеры отличаются высоким радиометрическим разрешением, а также качественной калибровкой каналов.

Следует также упомянуть гиперспектрометр ARTEMIS (Advanced Responsive Tactically-Effective Military Imaging Spectrometer) производства компании Raytheon (США), который был установлен в качестве основного целевого оборудования на борту спутника TacSat-3, запущенного на орбиту 19 мая 2009 года. ARTEMIS является развитием растрового гиперспектрометра HYPERION и позволяет производить съемку в 400 спектральных каналах в диапазоне от 400 до 2500 нм.

США долгое время занимали лидирующее положение в мире по разработке и использованию космической гиперспектральной аппаратуры. Однако, к середине 90-х – началу 2000-х гг. созданию космической гиперспектральной аппаратуры стали уделять активное внимание и европейские страны.

В 1994 г. одним из претендентов на использование в программе Earth Explorer Европейского космического агентства (ЕКА) стала гиперспектральная камера PRISM (Processes Research by an Imaging Space Mission), предназначенная для изучения атмосферы Земли. В создании концепции камеры по заказу ЕКА под руководством компании Aerospatiale (Франция) приняли участие организации из Германии и Италии.

В Великобритании в 2000 г. создана гиперспектральная камера CHRIS (Compact High Resolution Imaging Spectrometer), которая была установлена на экспериментальном микроспутнике PROBA-1. В 2001 г. начались работы по подготовке к использованию усовершенствованной камеры CHRIS на платформе АММ (Advanced Microsatellite Mission) по программе Spectre. В 2003 году с космодрома Байконур был запущен космический аппарат (КА) Mars Express, принадлежащий ЕКА. На борту этого КА находился гиперспектрометр OMEGA, который позволяет вести съемку в видимом (0,5-1,0 мкм) и инфракрасном (1,0-5,2 мкм) диапазонах спектра и с разрешением соответственно 7 и 13-20 нм.

В настоящее время гиперспектрометр HYPERION космического базирования является основным источником гиперспектральной информации, определенная часть которой находится в свободном доступе. Учитывая высокую востребованность гиперспектральных данных для решения широкого круга задач, исследования и разработка гиперспектральной аппаратуры по-прежнему продолжают за рубежом, в частности, в США и Западной Европе.

Гиперспектральная аппаратура для космического аппарата «Ресурс-П»: направления модернизации и перспективы развития

Архипов С.А., Кравченко С.О., Ли А.В., Линько В.М., Морозов С.А.,
Сальникова М.А.

ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»

msa@zenit-kmz.ru

Накопленный к настоящему времени опыт использования отечественных гиперспектральных приборов в различных отраслях народного хозяйства позволяет определить требования по улучшению тактико-технических характеристик такой аппаратуры. Исходя из потребностей пользователей, можно сформулировать следующие первоочередные направления модернизации видеоспектрометров.

- Расширение рабочего спектрального диапазона до 0,4-2,5 мкм.
- Повышение пространственного разрешения.
- Увеличение полосы захвата.

Рассматривая возможности реализации данных требований в аппаратуре ГСА для КА «Ресурс-П», приходим к следующим выводам.

- Увеличение пространственного разрешения получаемой гиперспектральной информации сводится либо к уменьшению размера светочувствительного элемента приемника, либо к увеличению фокусного расстояния входного объектива. Однако при использовании приемников на основе ПЗС-структур, любая попытка увеличить пространственное разрешение сталкивается с проблемой обеспечения необходимых частот считывания информации.

- В рамках существующей оптической системы ГСА обеспечение работы в широком спектральном диапазоне 0,4-2,4 мкм ограничивается тем, что входной, т.е. изображающий, объектив является линзовым, и, как следствие, обеспечить коррекцию его хроматических aberrаций в столь широкой области спектра не представляется возможным. Таким образом, объектив придется менять на зеркальный (или зеркально-линзовый).

- Увеличение полосы захвата приведет к существенному возрастанию поперечных габаритов узла фокального в существующей схеме ГСА, что сделает оптические детали нетехнологичными и сложными в изготовлении. Узел разделения каналов необходимо менять или совсем отказываться от него.

Обеспечение приведенных выше требований не может быть выполнено без существенного изменения схемного решения узла спектрометра и ГСА в целом.

Модернизация ГСА предполагает использование зеркальной оптики в изображающем объективе, переход на системы Оффнера или автоколлимационные зеркальные системы в видимом и ИК каналах спектрометра.

Схемные решения оптического тракта изображающих спектрометров

Архипов С.А., Кравченко С.О., Ли А.В., Линько В.М., Морозов С.А.
 ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»
msa@zenit-kmz.ru

К настоящему времени, в первую очередь, за рубежом, накоплен большой опыт создания изображающих спектрометров, или видеоспектрометров, позволяющих получать одновременно изображение объекта и спектральную информацию о нем. За прошедшее десятилетие создан и успешно функционирует целый ряд авиационных и космических приборов этого класса. Это позволяет, опираясь на открытые публикации¹, оценить современный уровень зарубежных разработок, тенденции в выборе схмотехнических решений, выявить приоритетные индикаторы качества этих систем.

Работы по созданию видеоспектрометров ведутся в настоящее время в США, Китае, Италии, Испании, Германии, Гонконге, Японии. Безусловным лидером являются США.

Наиболее известные аппараты, -HYPERION, CHRIS, AIRS, MRO (на орбите Марса), HySI, M3, ARTEMIS, - успешно эксплуатируются. Проекты PRISMA, EnMAP, NyspIRI, MSMI находятся в различных стадиях наземной отработки.

По результатам анализа публикаций можно сделать следующие выводы:

- классическая схема построения узла спектрометра на основе линзовой оптики и призмных дисперсионных устройств в настоящее время практически не используется²;

- внимание разработчиков в значительной мере сконцентрировано на схемах Оффнера и Дайсона. Первая практически безальтернативно используется в спектральном диапазоне 0,4-2,5 мкм. Схема Дайсона, в свою очередь, используется, как правило, в спектральном диапазоне 7,0-14,0 мкм;

- во многих проектах отчетливо прослеживается тенденция охватить в одном приборе диапазон спектра 0,4-2,5 мкм;

- входные (изображающие) объективы видеоспектрометров – это, чаще всего, зеркальные анастигматы с эксцентрично расположенным полем изображения или двухзеркальные внеосевые системы. Классические схемы типа «Корш» или «Ричи-Кретьен» используются значительно реже;

- призмные дисперсионные устройства различной сложности применяются достаточно часто. Однако приоритетно использование дифракционных решёток. Они, как правило, имеют равномерный шаг и различаются, в основном способом производства (нарезаемые на делительных машинах, получаемые методом компьютерной голографии или электронно-

¹Наряду с патентными материалами были проанализированы журналы «Optical Engineering», «Journal of Optical Society of America A», материалы конференций Оптического общества Америки (OSA) и международного общества SPIE за 2000-2012 гг.

² однако проекты подобных аппаратов все же есть, - например, MSMI.

лучевой литографии). Асферические дифракционные решетки с переменным шагом, с криволинейными штрихами, с кусочно-переменным углом блеска пока не нашли широкого применения, ввиду сложности производства.

Среди всех возможных схем построения видеоспектрометров схема Оффнера является наиболее перспективной из-за своей простоты и малых габаритов. Заслуживает внимания схема спектрометра с призмами Фери. Она близка по своим достоинствам к схеме Оффнера, однако, обладает нелинейной дисперсией.

Особенности оптических систем для многоканального гиперспектрометра

Стариченкова В.Д., Самохина И. А., Чиванов А.Н.

Филиал ОАО «ПО «Уральский Оптико-механический Завод им. Э.С.Яламова»
«Урал-ГОИ», г. Санкт-Петербург
uralgoi@mail.ru

В настоящее время для решения многих задач: экологических, МЧС, МО и др. необходима **одновременная** регистрация спектральных характеристик излучения наблюдаемых объектов и физических процессов в **широкой области спектра**: от УФ до ИК (от 0,2 мкм до 14,0 мкм). Обычно для перекрытия широкого спектрального диапазона используют его разбиение на несколько спектральных поддиапазонов (каналов).

В докладе представлены оптические системы (ОС) для разрабатываемых многоканальных гиперспектрометров. ОС разрабатывались для макетного образца многоканального гиперспектрометра (МГС), регистрирующего спектральную информацию одновременно в нескольких спектральных поддиапазонах (каналах). В качестве интерферометра был выбран интерферометр по схеме Саньяка. Количество спектральных каналов в ГВС было выбрано равным 4 для авиационных систем и 4 или 5 поддиапазонов для космических систем: : в УФ диапазоне – (0,25 – 0,3) мкм и (0,3 – 0,4) мкм, – в видимом диапазоне (0,5 – 0,9) мкм, в БИК диапазоне (1,0 – 2,4) мкм, - в средневолновом ИК (3 – 5) мкм, в ИК (8 – 14) мкм.

В составе разрабатываемой оптической системы для МГС использовались только зеркальные объективы. Отсутствие в этих объективах хроматических аберраций позволяет использовать:

- одинаковые объективы (серийное изготовление) в сформированных автономных спектральных каналах;
- один общий объектив на несколько спектральных каналов.

Ширина спектральных каналов (поддиапазонов) выбиралась с учетом поставленных перед МГС целевых задач: определение спектральных характеристик протяженных объектов (например, в экологических задачах) или малоразмерных объектов (в задачах МЧС и МО). Простейшее и наиболее корректное построение оптической системы (ОС) для МГС: автономные ОС в каждом спектральном канале, при этом габаритные характеристики МГС существенно увеличиваются.

Для малых КА требуется максимальное снижение габаритномассовых характеристик ОС МГС, поэтому разрабатывалась широкодиапазонная многоканальная ОС с уменьшенными габаритно-массовыми характеристиками.

Основные требования к ОС для многоканального гиперспектрометра:

1. Широкий спектральный диапазон.
2. Количество рабочих спектральных каналов не менее 3–6.
3. Оптическая система должна обеспечивать высокое качество, на уровне дифракционного, во всем спектральном диапазоне.

4. Оптическая система должна быть (желательно) основана на одном общем зеркальном объективе.

5. Элементы интерферометров в каждом канале должны быть (желательно) зеркальными и унифицированными для каждого из спектральных каналов.

6. Схема и конструкция оптической системы должны обеспечить возможность размещения конструкторских узлов нескольких спектральных каналов в количестве до 4-6 либо на выходе оптической системы, применительно к использованию в качестве основного в ОС объектива Кука, либо в предфокальном объеме, применительно к использованию в качестве основного объектива трехзеркального анастигмата типа Корша.

7. Относительные отверстия объектива и оптической системы собственно интерферометра должны быть не менее 1:4 и согласованы.

8. Энергетические параметры оптической системы (относительное отверстие и диаметр входного зрачка) должны обеспечивать необходимую величину отношения сигнал/шум при регистрации спектров как от протяженных по пространству образований, так и при регистрации спектров от малоразмерных («точечных») объектов.

9. Конструкция оптической системы и интерферометра, главным образом, должна быть предельно жесткой и устойчивой к температурным и механическим воздействиям.

10. Для обеспечения требований по п.9 элементы оптической системы и должны быть выполнены с использованием новых нестандартных оптических материалов, элементы конструкции с использованием новых конструкционных материалов (композитов).

Разработано два варианта широкодиапазонной многоканальной ОС:

- ОС на основе зеркального объектива по схеме Кука;
- ОС на основе трехзеркального анастигмата типа Корша.

Кроме того, разработаны зеркальные элементы собственно интерферометра: входной коллимирующий объектив и Фурье-объектив.

Итог:

-в ОС на основе трехзеркального объектива по схеме Кука, макет которого разработан и изготовлен для ГВС, конструктивно размещаются 3-4 канала: УФ, ВД и БИК или: ВД, БИК, средний ИК (3...5) мкм и ИК (8...14) мкм;

-в ОС на основе трехзеркального анастигмата по схеме типа Корша, конструктивно размещаются 4 - 5 спектральных каналов: УФ, ВД, БИК и 2 ИК. Конкретный выбор диапазонов определяется поставленной перед ГВС задачей. В каждом спектральном канале с использованием интерферометра по схеме Саньяка количество разрешаемых спектральных линий составляет не менее (1/3 – 1/4) от количества пикселей считывающей матрицы ФПУ, т.е. не менее 100- 150 спектральных «миниканалов».

В стендовом докладе будут представлены блок-схемы, оптические и компоновочные схемы ГВС для 2-х ОС.

Оптические системы гиперспектрометров космических телескопов

Савицкий А.М., Сокольский М.Н.
ОАО ЛОМО, г. Санкт - Петербург
Бакланов А.И., Ключников М.В.

Филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - НПП «ОПТЭКС»,
г. Москва, Зеленоград
mnsokolski@rambler.ru

Рассматриваются оптические схемы гиперспектрометров (ГС) космических телескопов (КТ) с многоэлементными приёмниками (МП) с размерами $M \times N$. Отмечается, что минимизация проекции a_{np} пикселя a МП - $a_{np} = \frac{a \cdot H}{f'_{экс}}$ за счёт увеличения $f'_{экс}$, где H – высота орбиты, $f'_{экс}$ – эквивалентное фокусное расстояние оптической системы объектива КТ и ГС, построенных по дисперсионной схеме или схеме Фурье – спектрометра, ограничивает размеры полосы захвата $B = \frac{M \cdot H}{f'_{экс}}$, увеличивает габариты и массу КТ в целом.

Рассматриваются оптические схемы ГС, встроенные в оптическую систему длиннофокусного объектива КТ: это ГС на основе WEDGE – светофильтра и описывается новая схема на основе матрицы минивидеоспектрометров.

WEDGE – светофильтр представляет собой светофильтр из набора узкополосных светофильтров, положение максимумов которых зависит от линейной координаты. Светофильтр устанавливается вплотную перед МП.

Оптическая схема ГС, реализуемая на ОАО ЛОМО в изделии на базе КТ «ОЭК – ВР», представляет собой матрицу – набор из k минивидеоспектрометров, установленных в шахматном порядке за расположенной в фокальной плоскости объектива КТ общей входной щелью, ширина которой равна a , а длина $l = K \cdot N$. Показано, что схема обеспечивает размеры проекции пикселя и полосы захвата такие же, как и самого КТ.

Проводится сравнительный анализ всех оптических схем ГС и параметров оптико – электронных камер на их основе.

Система приема и преобразования информации для гиперспектральной съемочной аппаратуры (СППИ-ГСА). Основные понятия.

Бакланов А.И., Забиякин А.С., Семин В.А., Серёгина А.С.
 Филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - НПП «ОПТЭКС»,
 г. Москва, Зеленоград
optecs@mail.ru

Применение гиперспектральной аппаратуры очень эффективно для решения хозяйственных и военно-прикладных задач, так как при дистанционном зондировании Земли позволяет получать изображение земной поверхности, представляющее собой не только яркость каждого пикселя, но и спектральную характеристику, что отсутствует на традиционных снимках.

Система приема и преобразования информации для гиперспектральной съемочной аппаратуры (СППИ-ГСА) разработана и изготовлена Филиалом ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - НПП «ОПТЭКС» на основании Технического задания №501-07-2008-СППИ-ГСА на составную часть ОКР «Разработка и изготовление СППИ для гиперспектральной съемочной аппаратуры (ГСА) КА «Ресурс-П». Основанием для выполнения составной части ОКР «СППИ-ГСА» является Техническое задание на составную часть ОКР 47КС-122-1105-2007 ТЗ «Разработка ГСА для КА «Ресурс-П», исполняемое ОАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева»

СППИ-ГСА входит в состав гиперспектральной съемочной аппаратуры (ГСА) аппарата "Ресурс-П" и обеспечивает:

- прием и преобразование в цифровой код сформированного в каналах спектрометра ГСА распределения облученности фотоприемников блоков ОЭП-ГСА, входящих в состав СППИ-ГСА;
- предварительную обработку гиперспектральной видеоинформации, формирование целевой информации (ЦИ) и выдачу ее в высокоскоростную радиолинию (ВРЛ);
- приема управляющей и служебной специальной информации (ССПИ) от систем КА и передачу ССПИ в ВРЛ;
- информационно-командный и телеметрический интерфейс с системами КА;
- контроль работоспособности ГСА, формирование и передачу в БВС информации оперативного контроля (ИОК);
- формирования циклограммы управления работой составных частей ГСА в заданных режимах функционирования;
- накопление и обработку температурной телеметрической информации (ТМИ) от системы оптико-механической (СОМ), входящей в состав ГСА, формирование циклограммы управления температурными режимами СОМ ГСА, передачу температурной ТМИ СОМ ГСА в составе служебной информации в ВРЛ;
- управление положением привода крышки входного окна СОМ ГСА;

- формирование стабилизированного тока для питания ламп устройства калибровки, входящего в состав СОМ ГСА, и управление его включением/отключением;

- формирование тестовых сигналов и тестовых файлов ЦИ и их трансляцию в ВРЛ;

- при обнаружении неисправности в основных комплектах автоматическое переключение на резервные комплекты блоков СППИ-ГСА и устройств ГСА, формирование кодового параметра, достаточного для распознавания неисправности.

Конструктивно СППИ-ГСА состоит из:

- блока БУ-ГСА, осуществляющего связь с системами КА и управление остальными блоками СППИ-ГСА;

- блока БУ-СОМ, управляющего устройствами СОМ ГСА;

- двух блоков ОЭП-ГСА, обеспечивающих формирование целевой информации и передачу ее в ВРЛ посредством двух резервированных каналов связи (по одному каналу с каждого блока ОЭП-ГСА-1 и ОЭП-ГСА-2);

- блока ИП-ОЭП-ГСА, осуществляющего выдачу питания на блоки ОЭП-ГСА;

- комплекта жгутов, соединяющих все блоки между собой;

- комплекта волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП), которые используются в каналах связи для передачи ЦИ в ВРЛ.

Все блоки резервированные, при этом реализована возможность работы системы при любой конфигурации основных и резервных комплектов блоков.

СППИ-ГСА обеспечивает прием оптической информации, формируемой каналами спектрометров ГСА, в диапазоне спектра от 0,4 до 0,96 мкм. В канале ВД1 спектрометра ГСА на одном оптико-электронном преобразователе (ОЭП-ГСА-1) формируется изображение в спектральном диапазоне от 0,4 до 0,65 мкм. В канале ВД2 спектрометра ГСА изображение формируется на втором оптико-электронном преобразователе (ОЭП-ГСА-2) в спектральном диапазоне от 0,63 до 0,96 мкм. Для преобразования оптического сигнала в видеоинформацию в СППИ-ГСА используются фотоприемники на основе матричных фоточувствительных приборов с зарядовой связью (ФПЗС). Размер фоточувствительных элементов ФПЗС 18x18 мкм. В блоках ОЭП-ГСА применены ФПЗС с числом фоточувствительных элементов:

- по строкам (в направлении движения КА) - 216, из них активные - 178;

- по столбцам (в направлении захвата ГСА) - 1024, из них активные - 1024.

Секция накопления ФПЗС блока ОЭП-ГСА разделена на 8 зон: 2 – темновых (информация с них не обрабатывается) и 6 – рабочих. Координаты границ 6 рабочих зон задаются при настройке ГСА номером первой строки в зоне.

В пределах каждой из шести рабочих зон реализована возможность независимого аналогового бинирования по столбцам. Коэффициенты бинирования по столбцам задаются для каждой зоны в отдельности в пределах

от 1 до 10 так, чтобы на максимальной кадровой частоте число информационных строк не превышало 50, а на пониженной кадровой частоте – 90. Также в ОЭП-ГСА реализована возможность аналогового бинирования по строкам. Коэффициент бинирования по строкам задается для фотозоны в целом и может иметь значения 1, 2, 4.

СППИ-ГСА обеспечивает отработку следующих режимов работы ГСА:

- съёмка (С), в котором реализуется преобразование оптического сигнала, сформированного в спектральных каналах ГСА, в цифровой электрический сигнал (видеоинформацию), обработка и выдача ВИ совместно со служебной информацией в ВРЛ;

- калибровка-1 (К1), предназначенного для контроля темновых сигналов ГСА в условиях эксплуатации;

- калибровка-2 (К2), предназначенного для контроля стабильности чувствительности ГСА в условиях эксплуатации;

- мира электронная (МЭ), предназначенного для проверки технического состояния канала формирования и передачи информации в БА ВРЛ;

- тест ЦВИ (ТЦВИ), предназначенного для контроля исправности канала выдачи ЦИ в ВРЛ путем формирования цифрового тестового сигнала на вход в ВРЛ;

- настройка терморегулирования-1 (НТ1), предназначенного для проверки исправности термонагревателей СОМ ГСА;

- настройка терморегулирования-2 (НТ2), предназначенного для определения тепловых параметров СОМ ГСА;

- коррекция СПО (КП), предназначенного для корректировки специального программного обеспечения при необходимости изменения алгоритмов работы составных частей СППИ-ГСА.

В любой момент времени СППИ-ГСА обрабатывает только один из перечисленных режимов работы ГСА. На фоне выполнения режимов «С», «К1», «К2», «МЭ», а также при необходимости по командам, поступающим в массиве исходных данных на режим, на межмаршрутных и межрежимных интервалах СППИ-ГСА осуществляет контроль и регулирование температуры СОМ ГСА путем выдачи управляющих воздействий на систему термоградиентной стабилизации (СТГС), входящей в состав СОМ ГСА. Данные, полученные от СТГС в результате контроля и регулирования температуры, передаются блоками ОЭП-ГСА в составе целевой информации в ВРЛ.

СППИ-ГСА включается в работу циклически. Цикл работы (режим) начинается с включения блока БУ-ГСА и заканчивается его выключением. За одно включение СППИ-ГСА обеспечивает отработку от 1 до 30 маршрутов длительностью не более 300 секунд, причем маршрут – это режим работы СППИ-ГСА, сопровождающийся передачей ЦИ в ВРЛ. Перед проведением режима СППИ-ГСА осуществляет прием от аппаратуры КА и обработку массивов исходных данных, содержащих необходимые параметры для проведения режима. В процессе работы СППИ-ГСА формирует информацию

оперативного контроля (ИОК) и по окончании последнего маршрута выдает ее в аппаратуру КА.

В СППИ-ГСА реализован покадровый метод приема и обработки изображений, формируемых ГСА, при этом СППИ-ГСА обеспечивает деления кадровой частоты для режимов «С», «К1», «К2», «МЭ», «ТЦВИ», указанной в таблице 1, с коэффициентами деления: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64. Целевая информация, формируемая блоками ОЭП-ГСА, представляется 14-разрядным двоичным кодом и передается в ВРЛ в процессе выполнения каждого маршрута.

Основные характеристики СППИ-ГСА приведены в таблице 1.

В блоках БУ-ГСА и БУ-СОМ установлено специальное программное обеспечение, реализующее алгоритмы работы СППИ-ГСА и управление устройствами СОМ ГСА. Для проверки функционирования СППИ-ГСА НПП «ОПТЭКС» разработана и изготовлена контрольно-проверочная аппаратура (КПА СППИ-ГСА) и испытательное программное обеспечение, имитирующие работу КА.

Таблица 1

Наименование параметра, единица измерения	Номинальное значение
Рабочий спектральный диапазон чувствительности блоков ОЭП-ГСА, мкм	0,4 - 0,96
Диапазон облученности ФПЗС в области спектра от 0,4 до 0,96 мкм блоков ОЭП-ГСА, Вт/м ²	$(0,01-6,0) \times 10^{-2}$
Отношение с/ш при максимальной облученности на входном окне блоков ОЭП-ГСА, не менее:	200
КПМ на частоте Найквиста в направлении строк и столбцов ФПЗС блоков ОЭП-ГСА, не менее: а) при $\lambda=0,65$ мкм б) при $\lambda=0,85$ мкм	0,5 0,45
Динамический диапазон выходного сигнала СППИ-ГСА (отношение сигнала насыщения к шуму считывания в темноте), не менее	3000
Нелинейность светосигнальной характеристики в диапазоне облученности ФПЗС в области спектра от 0,4 до 0,96 мкм блоков ОЭП-ГСА, не более:	2%
Неоднородность чувствительности фотоприемных элементов блоков ОЭП-ГСА, не более:	10%
Кадровая частота в режимах «С», «К1», «К2», «МЭ», «ТЦВИ» для блоков ОЭП-ГСА, Гц	253,3±0,6
Длительность маршрута, с	от 2 до 300
Минимальный межмаршрутный интервал режима «С», с	5
Минимальный межмаршрутный интервал режимов «К1», «К2», «МЭ», «ТЦВИ», с	48

Максимальная длительность рабочего участка режима, мин	40
Максимальное количество маршрутов за одно включение СППИ-ГСА	30
Разрядность выходной информации (бит/пиксель)	14
Дискретность отработки начала и конца маршрутов, с	0,125
Привязка кадров ВИ к БШВ с погрешностью, с, не более	$5 \cdot 10^{-4}$
Максимальная скорость передачи ЦИ в ВРЛ, Мбит/с, не более	1000
Мощность потребления при напряжении питания 27 В, Вт, не более:	
а) на маршруте без учета потребления СОМ ГСА	180
б) на маршруте с учетом потребления СОМ ГСА	250
в) на межрежимных интервалах при отключенных блоках ОЭП-ГСА и БУ-ГСА	70
Масса, кг	35±3,5

ФПЗС «Кадр-РП» для гиперспектральной аппаратуры

Вишневский Г.И., Четвергов М.В., Красовский А.С.

ЗАО «НПП «ЭЛАР», г. Санкт-Петербург

Выдревич М.Г.

ОАО «СТК-Силар», г. Санкт-Петербург

mail@npp-elar.ru

Курова О.П.

Филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ - Прогресс» - НПП «ОПТЭКС»,

г. Москва, Зеленоград

optecs@mail.ru

ФПЗС «Кадр-РП» разработан специально для применения в гиперспектральной аппаратуре к/а «Ресурс-П», архитектура его кристалла оптимизирована для задачи спектрального разложения каждой строки движущегося изображения, сформированного оптической системой на входе щели, и последующей проекции спектрального разложения строки на определенные строки фотозоны ФПЗС.

ФПЗС выполнен на основе кристалла матричного фоточувствительного прибора с зарядовой связью, установленного в герметичный газонаполненный корпус со встроенным термоэлектрическим охлаждением. Охлаждение кристалла осуществляется с помощью однокаскадного термоэлектрического микроохладителя, обеспечивающего в рабочем режиме перепад температур между горячей и холодной гранью до 40°C. Температура кристалла измеряется встроенным в корпус термометром сопротивления.

Структурная схема кристалла приведена на рисунке 1. Направление переноса заряда показано стрелками.

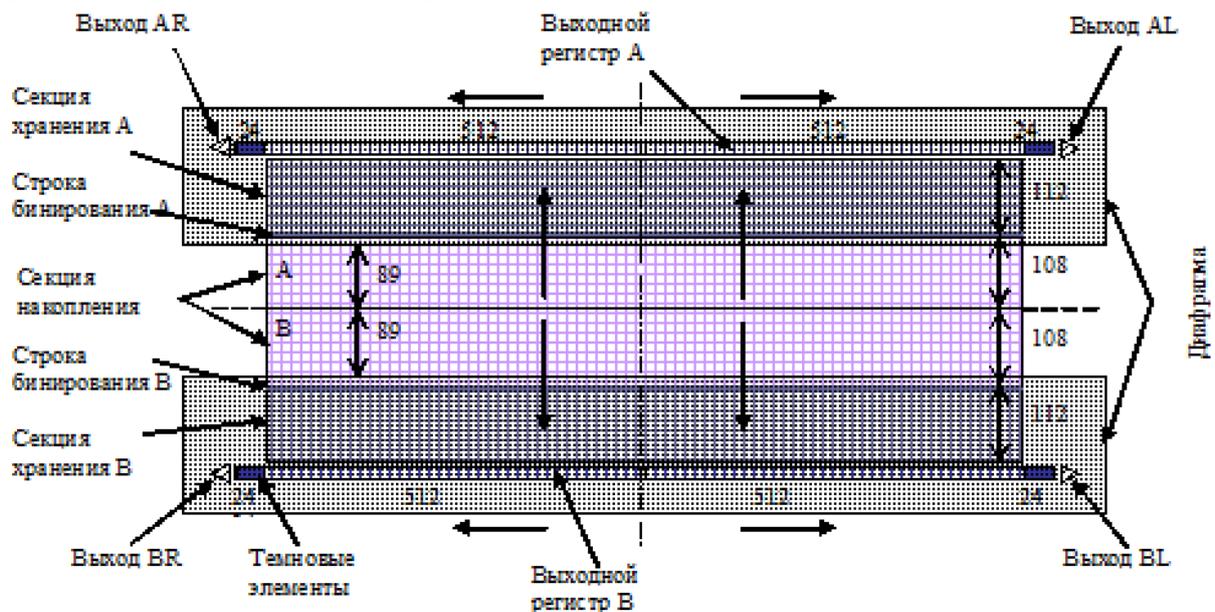


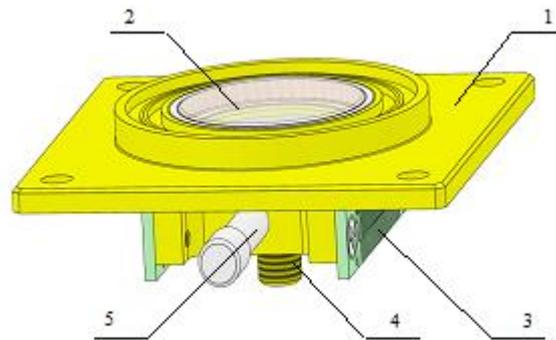
Рисунок 1. Структурная схема кристалла ФПЗС «Кадр-РП»

Кристалл представляет собой матричный приёмник изображения с кадровым переносом заряда, содержащий фоточувствительную область форматом 216 (В)×1024 (Г) элементов размером 18×18 мкм, «расщепленную» на две фоточувствительные секции накопления по 108 строк каждая, две идентичные секции хранения формата 112 (В)×1024 (Г), расположенные сверху и снизу от секций накопления и принимающие заряд из соответствующих секций, и четыре идентичных двухфазных считывающих регистра. Ячейки фотозоны имеют виртуально-фазную организацию с наклонными электродами, что позволяет достичь низкого уровня темнового тока и высокой квантовой эффективности в видимой и ближней ИК-области спектра. Наклонные электроды обеспечивают максимальную частоту переноса из секций накопления в закрытые от света секции хранения, что, таким образом, позволяет свести к минимуму «перемешивание» спектральных каналов между собой при считывании кадра в секции хранения. Секции накопления и хранения имеют двухфазное тактовое питание. Информация из каждой секции хранения параллельно передается в два идентичных двухфазных считывающих регистра. Каждый регистр считывания имеет 536 элементов (512 активных (информационных) и 24 "холостых" (избыточных) перед выходным устройством) и принимает заряды с 512 столбцов секции хранения. Считывающие регистры заканчиваются трехкаскадными выходными устройствами с плавающей диффузионной областью.

Секции хранения и несколько первых строк каждой секции накопления закрыты от света апертурной диафрагмой (гарантированно открыты по 89 из 108 строк каждой половинки фотозоны).

Конструкция секции хранения, считывающих регистров и выходных устройств обеспечивает возможность гибкого бинирования зарядовых пакетов элементов соседних строк (для формирования строки соответствующего спектрального канала) и соседних столбцов. Коэффициенты бинирования строк могут быть различны для разных спектральных каналов и определяются тактовой диаграммой.

На рисунке 2 показан внешний вид ФПЗС «Кадр-РП». Прибор имеет прецизионный герметичный корпус с входным оптическим окном и заполнен ксеноном высокой чистоты. Входное окно выполнено из стекла марки К 8 ГОСТ 3514-94 с двухсторонним просветляющим покрытием. Неплоскостность установочной поверхности посадочного фланца составляет не более 5 мкм, суммарная погрешность установки фоточувствительной поверхности кристалла относительно установочной поверхности посадочного фланца – не более ± 10 мкм, непараллельность входного окна и фоточувствительной поверхности кристалла – не более 10 угл. мин.



1 – установочная поверхность посадочного фланца; 2 – входное окно;
3- внешние контактные площадки; 4 – область крепления теплоотвода,
5 - откачной штенгель

Рисунок 2. Внешний вид ФПЗС «Кадр-РП»

В таблице ниже приведены основные фотоэлектрические параметры ФПЗС, на рисунке 3 – спектральная зависимость квантовой эффективности и ее разброс между образцами; на рисунках 4 и 5 – частотно-контрастная характеристика в узких спектральных диапазонах по горизонтали (в направлении пространственного разложения изображения) и по вертикали (в направлении спектрального разложения строки изображения), соответственно.

Основные фотоэлектрические параметры	Значения по ТУ ГК	Типовые значения
Зарядовая вместимость, тыс. эл.	≥ 200	330
Динамический диапазон, раз	≥ 4000	8600
Напряжение насыщения, мВ	≥ 600	1830
Крутизна преобразования выходного устройства, мкВ/эл	$\geq 3,0$	5,6
Среднее значение темнового сигнала, эл./яч.с (T=0°C)	≤ 200	20
Квантовая эффективность в максимуме, %	≥ 55	57
Пиковая неравномерность выходного сигнала в узких спектральных диапазонах, %	$\leq \pm 5$	$\pm 3,8$
Эффективность переноса по горизонтали	$\geq 0,99995$	0,99999
Эффективность переноса по вертикали	$\geq 0,99995$	0,99999
Нелинейность светосигнальной характеристики, %	$\leq 1,0$	0,22
Разбаланс выходного сигнала между каналами, %	$\leq \pm 15$	± 7

Временные параметры:

- Частота «быстрого» переноса – 500КГц (до 1500 КГц);
- Время «быстрого» переноса – (108+4)строк/500КГц=0,224мс (до 0,075 мс);
- Частота считывания в регистрах – 8,6 МГц (до 15 МГц);
- Частота строк при считывании (при частоте считывания в регистрах 8,6 МГц) – 14,8 КГц.

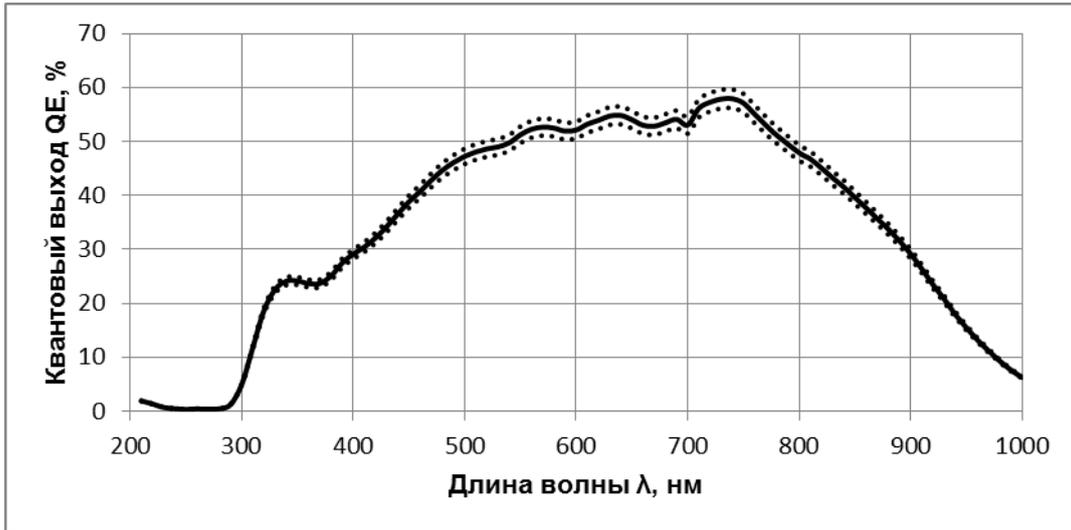


Рисунок 3. Спектральная зависимость квантовой эффективности ФПЗС «Кадр-РП» и ее разброс между образцами

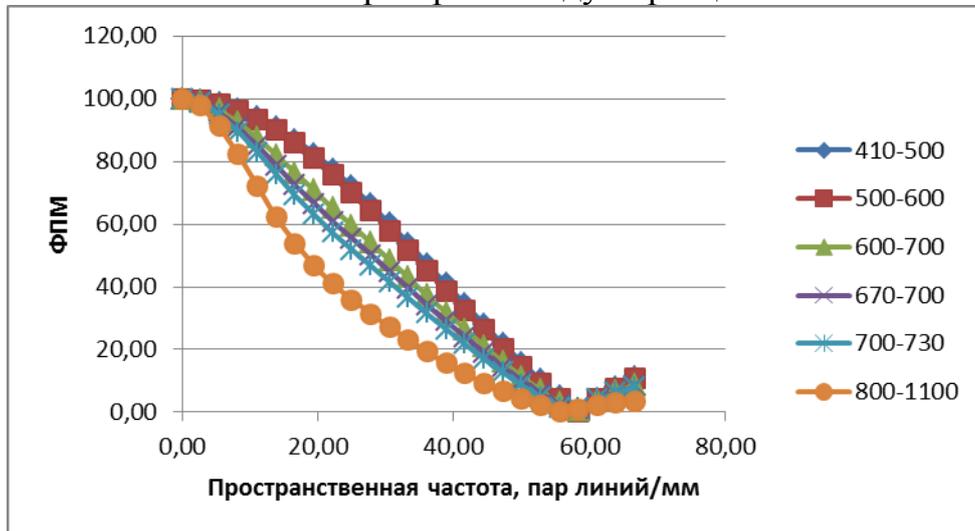


Рисунок 4. Частотно-контрастная характеристика ФПЗС «Кадр-РП» по горизонтали

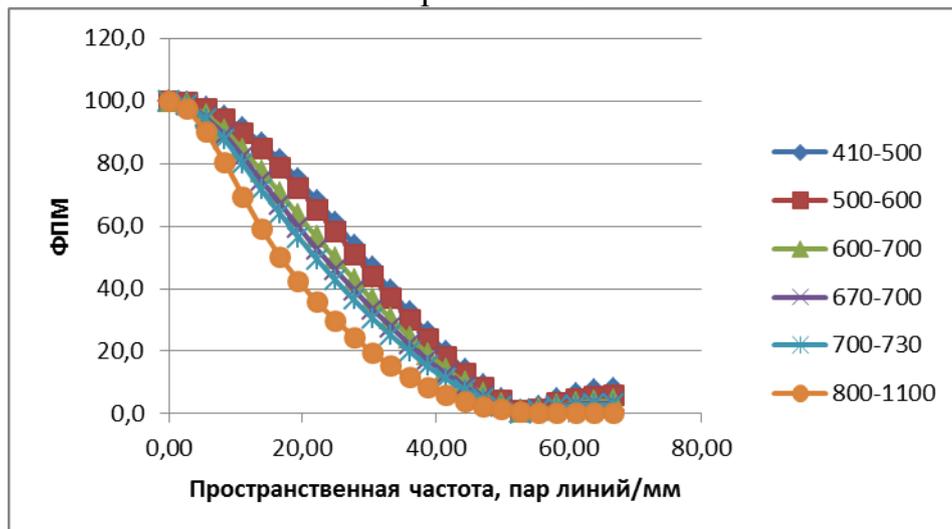


Рисунок 5. Частотно-контрастная характеристика ФПЗС «Кадр-РП» по вертикали

Видеоспектральные исследования за рубежом

Груздев В.Н., Шилин Б.В.

Центр экологической безопасности РАН, г. Санкт-Петербург

bshilin@rambler.ru

Реальное использование гиперспектральных методов, под этим понимается получение сотен изображений подстилающей поверхности в узких спектральных интервалах с авианосителей, относится к началу 80-х гг., когда были созданы, главным образом в США, авиационные многоспектральные-гиперспектральные оптико-механические сканеры фирм Daedalus и Geoph. Envir. Res. (количество каналов в диапазоне 0.4-13.5 мкм до 200 и более). Несколько позднее были созданы первые образцы видеоспектрометров, оптико-электронных приборов на основе матричных приёмников и полихроматоров с количеством каналов (монохромных изображений) до первых сотен. Это разработки JPL (США) – видеоспектрометры AIS и AVIRIS. В конце 80-х гг. в Канаде малой серией стал выпускаться видеоспектрометр CASi, к настоящему времени разработано несколько модификаций. К началу 2000-х гг. число разработок видеоспектрометров авиационного базирования достигло первых десятков, созданы приборы для лабораторных и полевых работ. Все они нашли применение при решении задач, где спектральные различия конкретных объектов и явлений невелики и необходимо получение информации о подстилающей поверхности с высоким пространственным и геометрическим разрешением. Это, например, выявление перспективных рудоконтролирующих зон и месторождений углеводородов по слабым спектрально-геохимическим аномалиям, выявление заболеваний растений, в том числе и сельскохозяйственных культур, на ранних стадиях различных неблагоприятных воздействий, контроль загрязнений водоёмов, загрязнений почв и растительности в зонах влияния горнорудных предприятий и т.д. Уделяется внимание военному назначению видеоспектрометров; показано, что спектральные образы объектов существенно увеличивают достоверность разведки в комплексе с традиционными методами, использующими морфологические признаки. Выполнены первые этапы исследований, показывающие перспективность теплового диапазона, в первую очередь для геологического картирования и дифференциации объектов по изменениям коэффициента излучения.

Интересны результаты лабораторных исследований по прочтению в отдельных узких спектральных каналах древних текстов на пергаменте и керамике.

В зарубежной и в отечественной литературе имеются разночтения в терминологии, характерные для нового развивающегося метода. За рубежом принят термин «imaging spectrometry», дословно переводящейся как «спектрометрия изображений», однако по-русски такой перевод звучит странно и термин «видеоспектральная съёмка» наилучшим образом отражает существо

вопроса. За рубежом используется также термин «гиперспектральная аэросъёмка», когда подразумевается получение большого количества монохромных изображений. Представляется, что эта терминология подходит для данных, получаемых оптико-механическими сканерами (например, GER 211 – 212 каналов). Целесообразно также обсудить такие понятия как информационный параллелепипед (гиперкуб), полихроматический кадр и т.д.

В докладе приведена сводная таблица, отражающая состояние разработок гиперспектральных сканеров и видеоспектрометров за рубежом.

Лётные испытания видеоспектрометров СПбУИТМО с полихроматором на дифракционной решетке

Алексеев А.А., Груздев В.Н., Шилин Б.В.

Центр экологической безопасности РАН, г. Санкт-Петербург

Красавцев В.М., Чиков К.Н.

Санкт-Петербургский университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург

Первый видеоспектрометр СПбУИТМО был разработан и эксплуатировался по программе «Фобос» в конце 80-х гг. Оставшийся лабораторный образец был доработан в части приёмного устройства, системы регистрации и программного обеспечения и в 2000 году были проведены его лётные испытания на самолёте Ан-30. Были получены монохромные узкоспектральные изображения хорошего качества и определены необходимые доработки. На первых этапах регистрация информации велась на цифровой видеоманитофон, а программами обработки предусматривалась возможность одновременного вывода только семи монохромных изображений. В дальнейшем регистрация велась на бортовой компьютер, а программное обеспечение позволяло выводить любое количество монохромных изображений и спектров уходящего излучения любых объектов земной поверхности. Замена приёмного устройства на более современное на одном из этапов испытаний дало возможность получать монохромные изображения, приближающиеся по качеству к фотографическому. Были подтверждены технические характеристики прибора – спектральное разрешение 2.5 нм в спектральном интервале 0.4-0.9 мкм, мгновенный угол зрения 1.0 мрад в поле обзора 28 градусов (примерно половина высоты полёта). В настоящее время лётные исследования ведутся с целью решения различных тематических задач и сбора спектральных данных для различных фоноцелевых ситуаций. Проводились совместные полёты с видеоспектрометрами ЗАО «Реагент» и ЗАО «Лептон» на самолётах Ан-30 и Ан-2. По нашему мнению приборы с полихроматором на призме имеют принципиальный недостаток – переменное разрешение по спектру: от 1.5 нм в фиолете до 15-20 нм в ближней ИК зоне. Красный-ближний ИК участок спектра является основным для диагностики и дифференциации растительности и выделения на её фоне антропогенных объектов по положению «красного края» спектральной кривой в интервале 700-750 нм и высоте «ИК плато». Ухудшение детальности спектральных кривых в диапазоне 600-1000 нм существенно ограничивает возможности решения тематических задач (отметим, что за рубежом практически используются только приборы с полихроматором на дифракционной решётке).

В 2006 году по аналогичной с предыдущим оптической схеме был изготовлен опытный образец «узкоугольного» видеоспектрометра – спектральное разрешение 2.5 нм в интервале 0.4-0.9 мкм, мгновенный угол зрения 0.15 мрад в поле обзора 6 градусов. Многократные испытания на

самолёте Ан-30 и вертолёте Ми-8 показали, что прибор может быть положен в основу изготовления видеоспектрометра для малого космического аппарата.

В докладе приводятся многочисленные примеры результатов видеоспектральной аэросъёмки – серии монохромных изображений и спектры уходящего излучения – различных фоноцелевых ситуаций в различных ландшафтно-климатических зонах.

Бортовой комплекс дистанционного зондирования Земли среднего разрешения для микроспутников

Беляковский В.И., Сикорский Д.А., Котов М.Н., Климович Т.В.
Открытое акционерное общество «Пеленг», г. Минск, Республика Беларусь

Ежегодно объем задач, решаемых системами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса, увеличивается. Это задачи по изучению, исследованию, мониторингу поверхности Земли. Основное направление развития отрасли ДЗЗ – глобальный мониторинг поверхности Земли в различных диапазонах электромагнитного спектра. Для решения задач глобального мониторинга создаются группировки КА ДЗЗ, которые позволяют оперативно получать требуемую информацию. В зависимости от специфики решаемой задачи, КА могут быть оснащены различными типами съемочной аппаратуры: высокого, среднего или низкого разрешения, многоспектральной, радиолокационной и т.д. Класс задач определяет технический облик КА и соответственно стоимость системы в целом. Для снижения стоимости системы разрабатывают микроспутники массой до 100 кг. Данное решение накладывает жесткие требования к массе, габаритам и энергопотреблению съемочной аппаратуры. В настоящее время на мировом рынке существуют организации, выпускающие недорогие космические платформы для микроспутников (например, SSTL, BST и др.) и предлагающие ряд решений по съемочным системам.

Для решения задач глобального мониторинга поверхности Земли из космоса, с целью дальнейшего развития белорусской и российской систем ДЗЗ, ОАО «Пеленг» планирует в рамках программы Союзного государства «Мониторинг-СГ» разработать экспериментальный образец бортового комплекса ДЗЗ среднего разрешения для микроспутников. В состав бортового комплекса ДЗЗ будут входить панхроматическая съемочная система, видеоспектрометр и обзорная камера.

Экспериментальный образец бортового комплекса ДЗЗ среднего разрешения для микроспутников позволит обеспечить съемку поверхности Земли обзорной камерой с разрешением 350 м с полосой захвата 650 км, панхроматической камерой с разрешением 5-10 м и видеоспектрометром с разрешением 50-100 м в 60 спектральных каналах с полосой захвата 50 км. В процессе выполнения проекта планируется разработать и изготовить экспериментальный образец бортового комплекса ДЗЗ, контрольно-проверочный комплекс (предназначенный для автономных наземных испытаний бортового комплекса ДЗЗ), разработать программное обеспечение первичной обработки данных, в том числе функционирующее непосредственно в составе комплекса. В процессе изготовления комплекса планируется провести анализ вариантов реализации, отработку выбранных технических решений и испытания комплекса.

Спектрометр для определения газового состава и содержания аэрозолей в атмосфере Земли СА-МП для перспективного космического аппарата «Метеор-МП» №1

Ризванов А.А.

ФГУП ЦНИИмаш, Московская область, г. Королёв,

arizvanov85@yandex.ru

Вороков А.В.

ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», г. Москва

vorokovpost@yandex.ru

Спектрометр для определения газового состава атмосферы СА-МП входит в состав целевой аппаратуры перспективного космического аппарата «Метеор-МП» №1 (солнечно-синхронная орбита с планируемой высотой 820,7 км), предназначенного для решения задач гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды. Спектрометр характеризуется широким спектральным диапазоном (от 240 нм до 1700 нм и выборочно – в области от 2000 нм до 2400 нм) и полосой захвата (угол поля зрения – 62°). Аппаратура СА-МП имеет 8 спектральных каналов и высокое спектральное разрешение (от 0,3 нм до 1,0 нм в различных каналах). Таким образом, по данным аппаратуры СА-МП существует возможность определения от 15 газовых компонент атмосферы Земли (в том числе озона) при помощи метода регистрации отражённого и рассеянного солнечного излучения. Высокая разрешающая способность и широкий спектральный диапазон работы прибора позволят обнаружить следы малых газовых составляющих (МГС) на уровне пиксель/метр, при этом измеряются концентрации МГС как естественного, так и антропогенного происхождения. Также спектрометр сможет определять концентрацию аэрозолей и некоторые характеристики облаков.

В настоящем докладе обоснован выбор технических характеристик спектрометра, изложено состояние технологической базы, необходимой для создания современной аппаратуры для исследования процессов, происходящих в атмосфере Земли, представлены первые результаты работ. Аппаратура СА-МП по характеристикам не уступает перспективным аналогичным зарубежным приборам и отвечает последним научным и инженерным достижениям в данной области.

Акустооптический микровидеоспектрометр

Перчик А.В.

НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

perchik@bmstu.ru

Боритко С.В.

НТЦ уникального приборостроения РАН, г. Москва

boritko@mail.ru

Одним из наиболее универсальных носителей информации является оптическое излучение. Оно распространяется в водной и воздушной среде, для него имеются разнообразные естественные источники излучения, в том числе Солнце и высокочувствительные приемники. Высокая селективность регистрации оптических объектов обеспечивается при использовании спектральных методов. Например, глаз человека, имеющий всего три вида цветовых рецепторов, способен различать миллионы оттенков, а птицы, имеющие дополнительный четвертый цветовой рецептор для ближнего УФ диапазона выделяют намного больше значимых деталей объектов в окружающей природе.

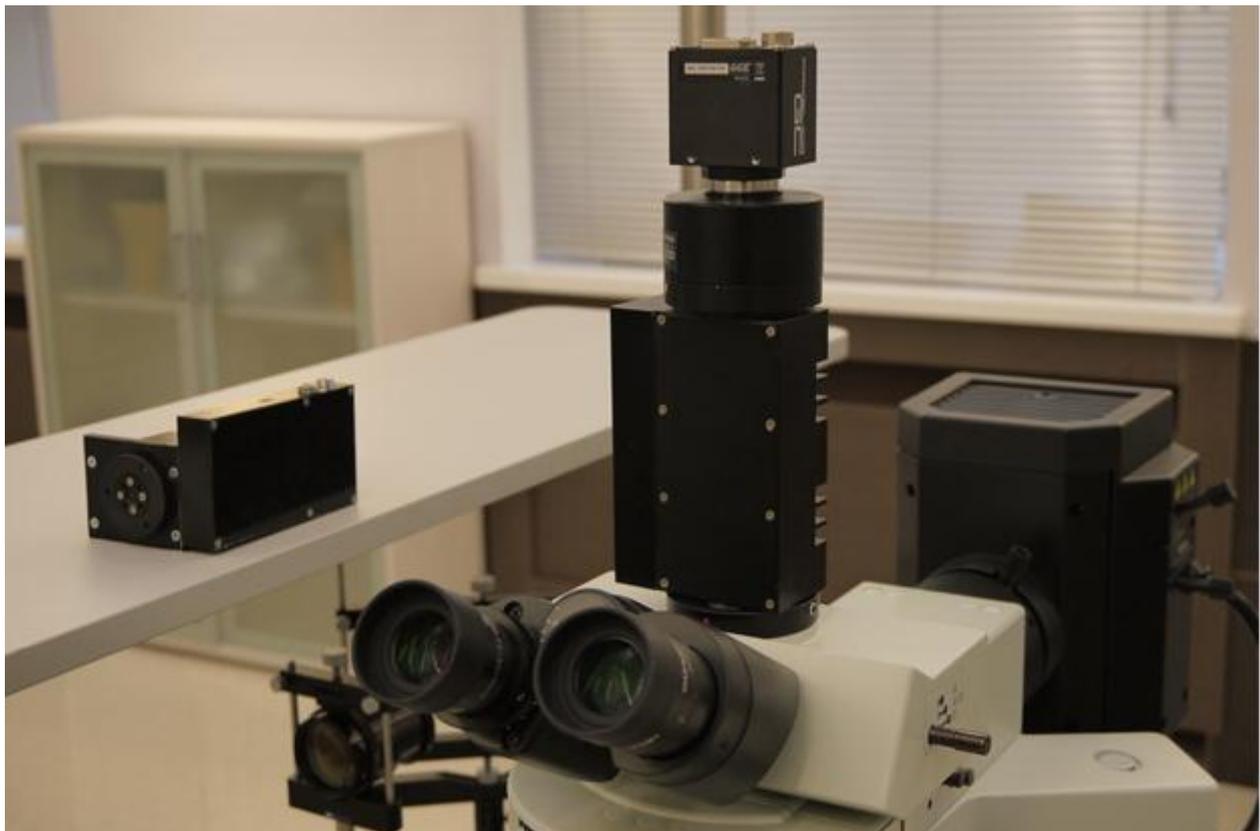


Рис. 1 Акустооптический видеоспектрометр и видеомонохроматор (слева)

Современные технологии позволяют создавать спектральные устройства, имеющие тысячи каналов в видимом диапазоне, что открывает принципиально новые возможности для распознавания объектов. Эти технологии основаны на

создании в среде с помощью ультразвука периодической структуры, играющей роль дифракционной решетки, осуществляющей спектральный анализ. Важно, что такие решетки могут создаваться за микросекунды, что принципиально для мониторинга обстановки в реальном времени в частности с борта быстродвижущегося носителя, например – самолета.

На основе таких спектральных оптических элементов, получивших название акустооптических, созданы спектральные устройства разнообразного типа, например, бортовые спектрометры, мобильные и стационарные газоанализаторы и даже приборы для подводных измерений в толще воды.

Одним из замечательных свойств таких систем является возможность непосредственно регистрировать спектральные изображения объектов, т.е. пространственное распределение яркости на произвольной длине волны. Это дает возможность визуализировать некоторые физико-химические, биологические, структурные особенности объекта, например, распределение хлорофилла в водоемах, облаков газов в атмосфере, пораженную растительность. Последнее свойство, например, позволяет уверенно выявлять маскировку на местности, выполненную с помощью сорванной растительности (веток, травы, листья), а также места с пораженным растительным покровом, например, минные поля.

Наличие такой универсальной быстродействующей аналитической аппаратуры, допускающей эксплуатацию в полевых условиях, открывает широкие возможности ее использования в системах наблюдения, системах безопасности и других.

Данный доклад посвящен описанию прибора, реализующего данный подход для задач микроскопии - микровидеоспектрометра.

С помощью акустооптического фильтра, установленного в оптическом тракте микроскопа (рис.1) и ПЗС камеры получают ряд изображений объектов в узких спектральных интервалах. По наличию спектральных особенностей судят о свойствах исследуемых объектов. Примеры спектральных изображений, полученных с помощью данного прибора, представлены на рис.2.

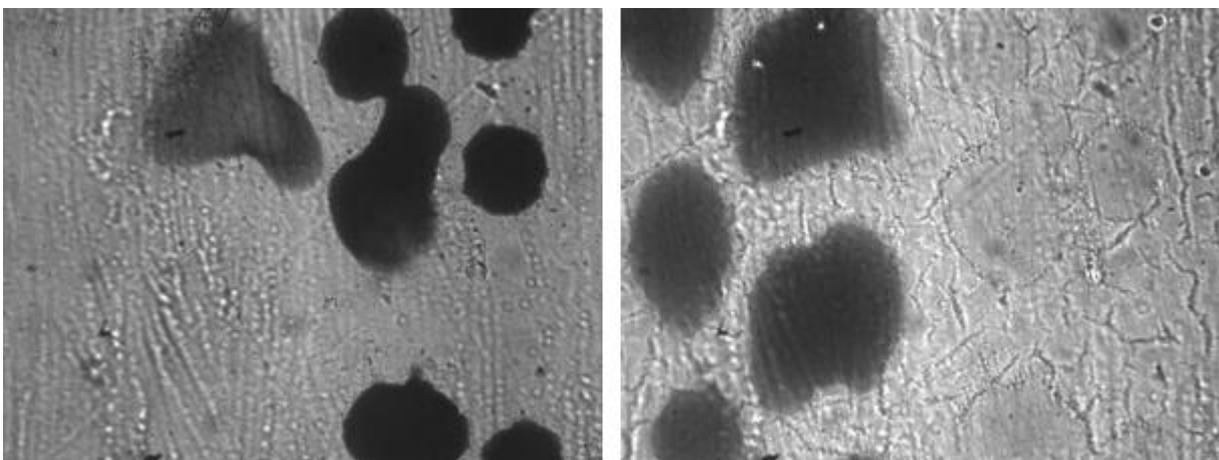


Рис. 2. Спектральные изображения тест - объекта на длинах волн 600 нм и 520 нм

Подобные системы могут быть применены в медицине для анализа тканей живых организмов, криминалистике, для анализа различных видов чернил, бумаги и др.

Литература

1. Пожар В.Э., Пустовойт В.И. Возможности создания новых систем видения на основе акустооптических видеоспектрометров. // Радиотехника и электроника, 1996. Т. 41. В. 10. С.1272-1278.

2. В.И. Пустовойт, В.Э. Пожар, Е.А. Отливанчик, С.В. Боритко, А.В. Перчик, и др. “Современные средства и методы акустооптической спектроскопии” Успехи современной радиоэлектроники №8 М:2007, с.48-564.

Аппаратная и программно-алгоритмическая реализация пространственно-распределенных спектральных измерений в режиме удаленного доступа

Зимин А.М., Тройнов В.И.
 МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
zimin@power.bmstu.ru

В ускорителях магнетронного типа арочная конфигурация магнитного поля обуславливает сильную зависимость параметров плазмы от координат. В молекулярных средах плазма является многокомпонентной: помимо молекул, атомов и ионов плазмообразующего газа здесь присутствуют атомы и ионы материала катода-мишени магнетрона. Исследование разряда проводилось с помощью спектрально-диагностического комплекса [1], созданного в МГТУ им. Н.Э. Баумана на базе спектрометра AvaSpec-2048 фирмы AVANTES и позволяющего осуществлять автоматическую регистрацию спектра в различных областях разряда, а также его обработку и анализ (рис. 1).

После прохождения через систему диафрагм оптической головки излучение фокусируется коллимационной линзой на торце размещенного в вакуумной камере оптоволоконного кабеля. Ось оптической головки направлена перпендикулярно оси разряда, чтобы исключить попадание на оптические элементы диагностики расплывших атомов. Двухкоординатная система позволяет перемещать оптическую головку с шагом до 0,2 мм вдоль и поперек оси разряда.

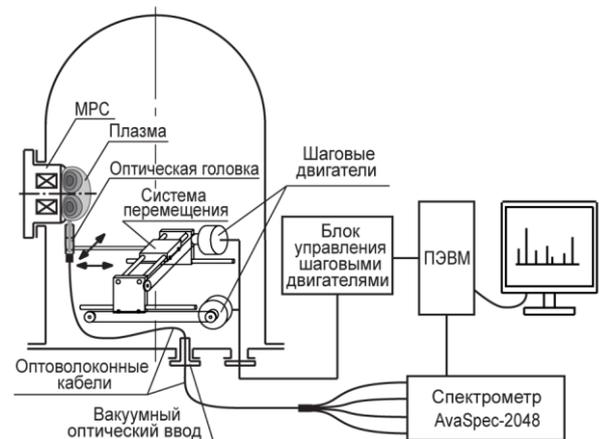


Рис. 1. Автоматизированный диагностический

Для анализа пространственных зависимостей излучения плазмы разряда в дейтерии проводилась регистрация более 1000 спектров с различными временами интегрирования. Типичный спектр разряда представлен на рис.2.

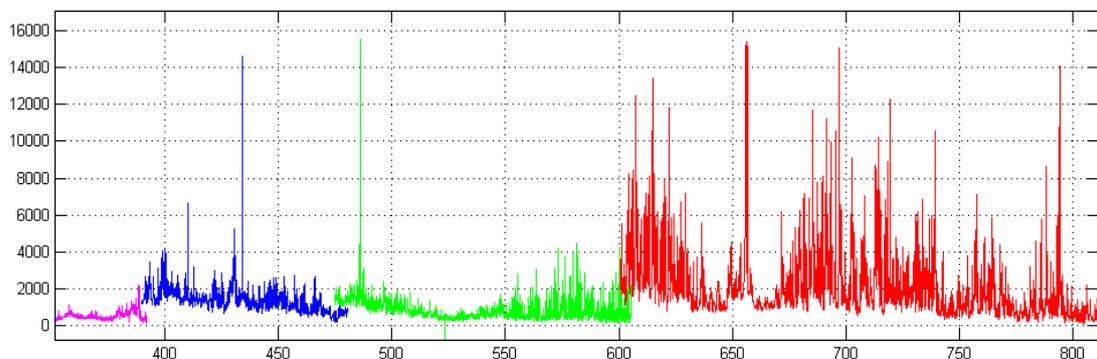


Рис. 2. Спектр разряда в дейтерии

Для распознавания и обработки спектров в автоматическом режиме созданы электронный атлас электронно-колебательно-вращательных переходов для дейтерия и комплекс программ в среде MATLAB.

Симметрия полученных распределений относительно оси разряда позволяет применить преобразование Абеля и получить распределения излучательной способности по радиусу разряда $\epsilon(r)$. Показано, что излучательная способность атомных линий при удалении от катода-мишени спадает быстрее, чем для молекулярных полос. Поскольку магнетронная плазма дейтерия является оптически тонкой, то полученные распределения интенсивности $\epsilon(r, z)$ могут быть использованы для томографии.

Созданный комплекс позволяет осуществлять удаленный доступ к управлению спектрометром для изменения его режимов работы, а также оперативную автоматизированную обработку результатов [2].



Рис. 3. Схема проведения эксперимента по спектроскопии через глобальную сеть

Управляющий работой спектрометра компьютер (Lab-сервер) связан локальной сетью с Web-сервером, доступным из сети Интернет (рис. 3). При проведении сетевого эксперимента с помощью интерфейса удаленного управления, генерируемого с помощью PHP-скриптов в виде динамических HTML-страниц, задаются параметры режима работы спектрометра, которые после проверки на корректность заносятся в интегрированную базу данных и затем реализуются.

Разработанное программное обеспечение поддерживает функционирование подсистем регистрации и авторизации экспериментаторов, подсистем обучения и контроля знаний, пользовательские интерфейсы удаленного управления, доступа и сетевой обработки результатов проведенных экспериментов, рассчитанные на использование Web-браузера, а также интегрированную базу данных, реализованную под управлением MySQL. Windows-служба SpectrService, разработанная в среде Borland Delphi и размещенная на Lab-сервере, периодически опрашивает таблицы базы данных, в которых хранится информация об отправленных запросах на регистрацию спектров, и ставит соответствующие сценарии в очередь на выполнение.

Литература

1. Автоматизированная диагностика плазмы магнетронного разряда по эмиссионным атомно-молекулярным спектрам / В.М. Градов, А.М. Зимин, С.Е. Кривицкий и др. // Прикладная физика. 2012. №3. С. 44.
2. Автоматизированная сетевая учебно-научная лаборатория по спектроскопии плазмы / А.М. Зимин, А.В. Шумов, С.Е. Кривицкий и др. // Информационные технологии. 2011. № 6. С. 72.

Апохроматические объективы для гиперспектральной аппаратуры.

Кушнарев К.Г.

ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»

georg@zenit-kmz.ru

В рамках ОКР по созданию гиперспектральной аппаратуры для КА «Ресурс-П» разработаны объективы с апохроматической коррекцией для рабочего спектрального диапазона от 0,4 до 1,0 мкм. Характеристики объективов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристика	Объектив		
	ОИ	ВД1	ВД2
Спектральный диапазон $\Delta\lambda$, мкм	0,4-1,0	0,40-0,65	0,63-1,0
Фокусное расстояние, мм	285	270	270
Относительное отверстие 1:К	1:3,2	1:3,2	1:3,2
Линейное поле изображения $2Y'$, мм	19,0	30,6	30,6

Объективы рассчитаны по одной базовой девятилинзовой оптической схеме (рис 1).

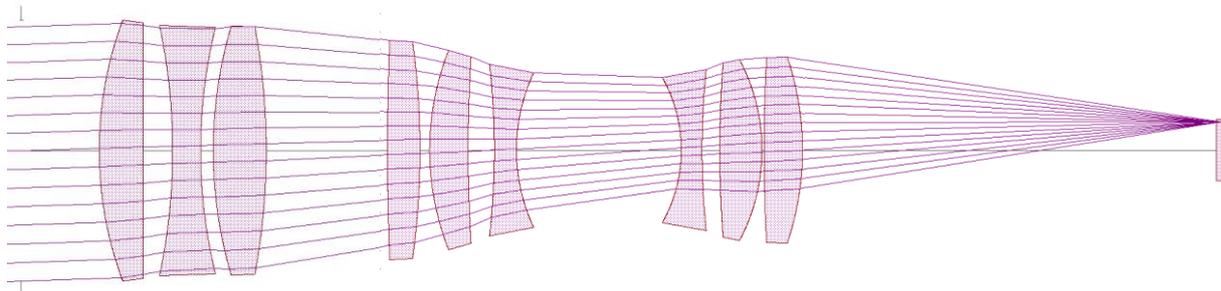


Рис. 1. Оптическая схема объектива

Схема включает три компонента, каждый из которых состоит трех линз. В заднем фокальном отрезке объектива ОИ устанавливается плоскопараллельная пластина из стекла К8 толщиной 2 мм, в объективах ВД1 и ВД2 – призмы оптической толщиной 43 мм. Объективы имеют телецентрический ход главных лучей в пространстве изображения и вынесенный входной зрачок. Величина дисторсии не превышает значения 0,1-0,2%. Виньетирование отсутствует. Остаточные aberrации исправлены до уровня, при котором коэффициент Штреля не менее 0,8 для всего поля зрения во всем рабочем спектральном диапазоне.

Изготовленный комплект объективов подтвердил расчетное качество изображения и прошел полный цикл автономных испытаний, включая испытания на ударные, вибрационные и температурные воздействия, с положительными результатами.

Стенд функционального контроля электронных блоков для опτικο-электронных систем

Гасилина О.В., Смирнов А.В.
ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»

В настоящее время наметилась устойчивая тенденция увеличения выпуска высокоточных опτικο-электронных серийных изделий, в состав которых входят электронные блоки различной сложности, и в этой связи возникает потребность в их автоматизированной проверке контроля качества, так как наибольшее количество отказов изделий приходится именно на электронные системы. Эффективное диагностирование неисправностей в сложных электронных системах методами неавтоматизированного контроля практически невозможно. В докладе рассмотрены вопросы разработки универсального стенда функционального контроля (стенд ФК) для диагностики ряда электронных блоков. Стенд ФК позволяет:

1. обеспечивать программно-управляемую подачу дискретных сигналов на входы объекта контроля и контроль дискретных сигналов на выходах объекта контроля с уровнями сигналов TTL-логики;
2. обеспечивать программно-управляемое преобразование напряжения на выходах объекта контроля в 16-ти разрядный цифровой код;
3. обеспечивать программно-управляемое преобразование 14-ти разрядного кода в напряжение, подаваемое на входы объекта контроля;
4. обеспечивать программную коммуникацию с объектом контроля по порту с интерфейсами RS-232/RS-422/RS-485;
5. обеспечивать программную коммуникацию с объектом контроля по двум портам с интерфейсом SPI;
6. обеспечивать подачу питания на средства измерения, используемые совместно со стендом при проверке объекта контроля;
7. обеспечивать контроль внутрисхемных электрических сигналов в контрольных точках объекта контроля (дискретных состояний и напряжения);
8. обеспечивать RAD-разработку программного обеспечения за счет готовых базовых компонентов управления стендом.

Внедрение стенда ФК обеспечивает:

- снижение трудоемкости контроля (в 3 - 10 раз);
- увеличение объема контроля, а, следовательно, повышение качества;
- повышение объективности контроля, за счет снижения влияния человеческого фактора;
- увеличение гибкости контроля при отладке опытных образцов изделий, (большинство усовершенствований реализуется доработкой программного обеспечения без физической доработки контрольного оборудования);
- повышение эффективности при поиске неисправностей и дефектов;

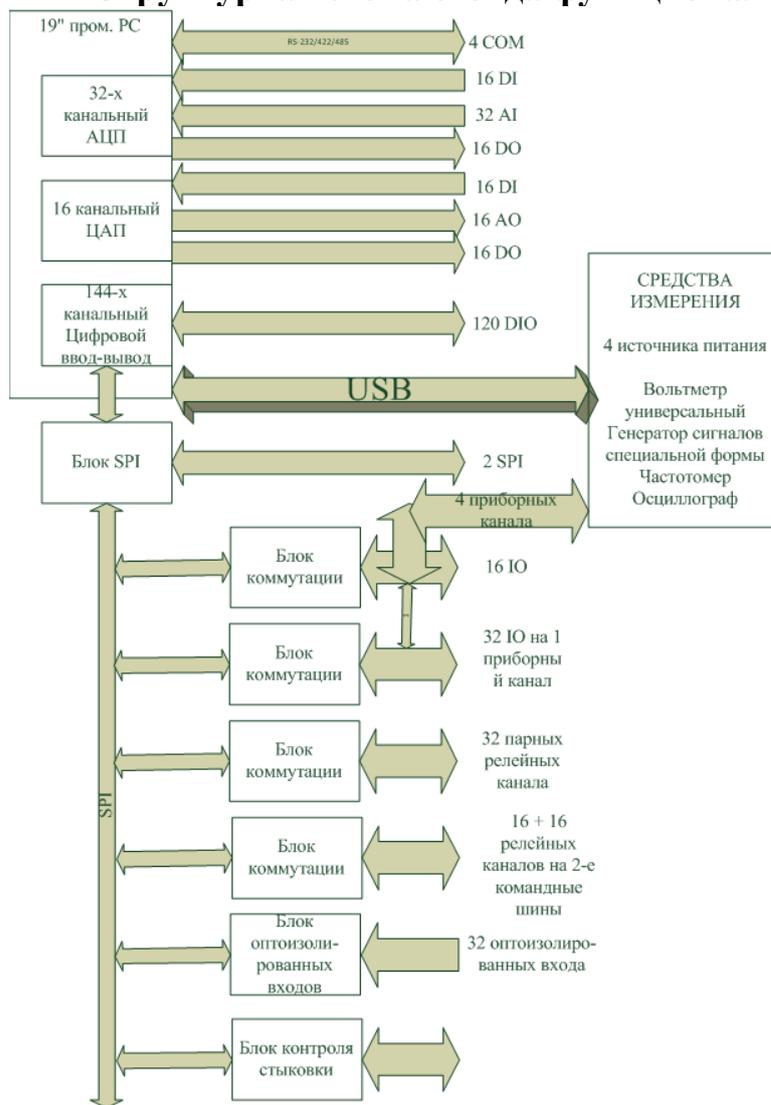
- на одном оборудовании можно осуществлять контроль большого числа разных блоков;

После внедрения стенда для автоматизации контроля каждого блока необходимы:

- разработка кабеля соединительного;
- разработка программы автоматизированного контроля.

Стенд будет использоваться для автоматизированного контроля электронных блоков серийных изделий, а также для перспективных вновь разрабатываемых и внедряемых на ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» изделий.

Структурная схема стенда функционального контроля



Секция 2, 3

Фурье-спектровизоры

Горбунов Г.Г.

Федеральное Государственное унитарное предприятие «Научно-производственная корпорация «Государственный оптический институт имени С. И. Вавилова», г. Санкт-Петербург
gggorbunov@mail.ru

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является вторым после телекоммуникационного сектора направлением авиационной и космической индустрии по динамике развития. К 2006 г. мировой объем продаж космических снимков превысил 1,5 млрд. долл. США. Пространственная разрешающая способность является одной из основных, но не единственной характеристикой системы ДЗЗ. К числу важнейших параметров относят число спектральных каналов и спектральное разрешение, площадь зоны захвата, оперативность получения видовой информации, радиометрическое и геометрическое качество изображений. Дистанционное зондирование Земли с помощью многоспектральных и гиперспектральных приборов стало одним из наиболее перспективных направлений развития оптико-электронной аппаратуры XXI века.

Практически все разработанные в России видеоспектрометры используют классические призмные или дифракционные спектральные приборы, хотя за рубежом уже уверенно начинают лидировать гиперспектральные и ультраспектральные системы изображения, выполненные на основе метода Фурье-спектрометрии. Их для простоты можно назвать Фурье-спектровизоры.

Разрабатываемые фурье-спектровизоры, обладая всеми преимуществами классических гиперспектральных или ультраспектральных видеоспектрометров, вместе с тем имеют ряд существенных дополнительных положительных черт:

- большая светосила - большой телесный угол, в пределах которого с площади кодирующего устройства может собираться исследуемое излучение при том же относительном спектральном разрешении;
- мультиплексность - одновременность регистрации всех спектральных интервалов;
- высокая точность привязки шкалы волновых чисел;
- большой диапазон реализуемых спектральных разрешений;
- большая ширина одновременно регистрируемого спектрального интервала, ограничиваемая только пропусканием оптики и чувствительностью приемника;
- значительное уменьшение числа необходимых объективов (возможно отсутствие щели);
- возможность организовать режим накопления сигнала.

Преимущества использования метода фурье-спектрометрии, практически, позволяют получить новые качества разрабатываемой аппаратуры, но требуют

очень высоких (интерференционного уровня) точностей изготавливаемых оптико-механических узлов и деталей. Несмотря на это, большинство последних разработок США, Канады и Франции используют именно этот метод. Приводятся примеры отечественных разработок.

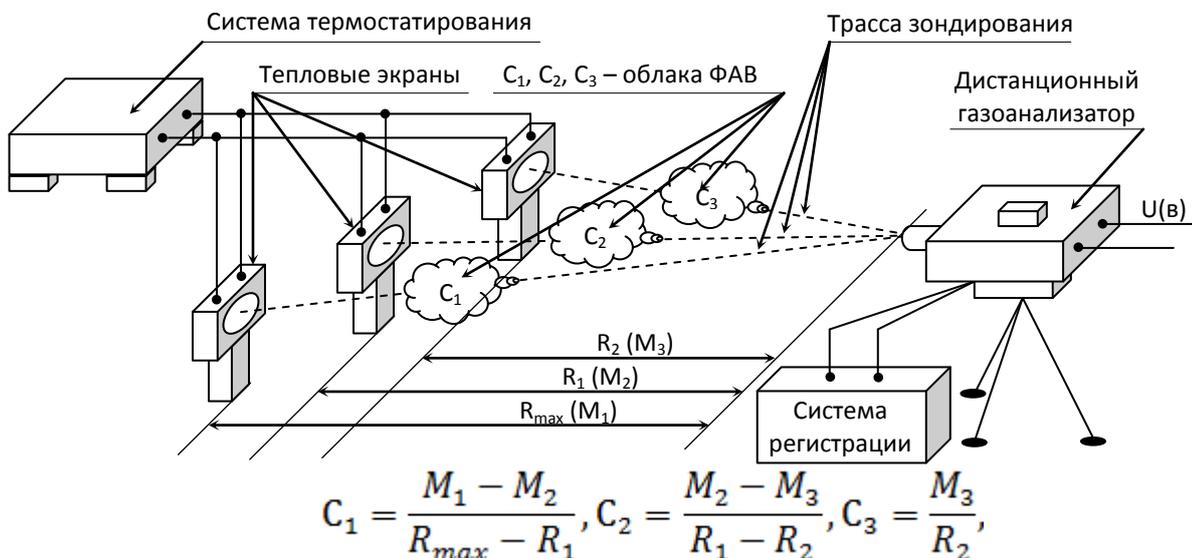
Оценка возможности применения инфракрасных фурье-спектрорадиометров для дистанционного химического мониторинга

Ефимов И.Н., Григорьев А.А., Шлыгин П.Е., Позвонков А.А.
 ФГКУ «33 Центральный научно-исследовательский испытательный институт»
 Минобороны России
shlygin.pe@mail.ru

В настоящее время в связи с бурным развитием микроэлектроники, оптики и лазерной техники широкое распространение получили дистанционные средства химической разведки и контроля. Применение дистанционных средств индикации пассивного типа в районах размещения химически опасных объектов является одним из направлений оптимизации всей системы химического мониторинга воздушного бассейна этих районов. Дистанционные средства индикации рассматриваются специалистами как наиболее перспективные средства обнаружения загрязняющих веществ и обеспечения оперативной количественной информацией об источниках и масштабах загрязнения.

В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы являлась оценка возможности применения дистанционных средств индикации военного назначения для контроля химической и экологической обстановки в случае нарушения технологических регламентов и аварий на химически опасных объектах.

Вариант применения дистанционного инфракрасного спектрорадиометра для решения задач химического мониторинга приземного слоя атмосферы в районе размещения химически опасных объектов приведен на рис. 1.



где C_1, C_2, C_3 – массовые концентрации загрязняющих веществ;
 M_1, M_2, M_3 – интегральные концентрации загрязняющих веществ на трассе зондирования (mg/m^2)

Рис.1. Схема контроля концентрации паров загрязняющих веществ в рабочей зоне химически опасных объектов

Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что при увеличении температурного контраста между анализируемым облаком загрязняющих веществ и фоновой обстановкой (подстилающая поверхность, небосвод, строения и т.п.) на 8-10 градусов, чувствительность обнаружения повышается в 1,4-2 раза. Это означает, что при установке в зоне химического мониторинга отражающих тепловых экранов может быть достигнута чувствительность обнаружения загрязняющих веществ на уровне предельно допустимых концентраций в воздухе рабочей зоны, установленных для сильнодействующих ядовитых веществ первого класса опасности (10^{-4} - 10^{-5} мг/л). При этом в зависимости от геометрии пространственного расположения тепловых экранов на местности или внутри производственных помещений обеспечивается решение задачи контроля массовой концентрации паров опасных химических веществ в зоне химического мониторинга. Схема химического мониторинга на основе применения техники инфракрасного пассивного зондирования и тепловых экранов может быть реализована на химически опасных объектах без существенных экономических издержек. Результаты проведенного анализа аналитических возможностей инфракрасных спектрометров подтверждают перспективность модернизации системы контроля химической и экологической обстановки на химически опасных объектах путем создания глобальной системы дистанционного химического мониторинга.

Для создания системы дистанционного контроля концентраций загрязняющих веществ на химически опасных объектах необходимо решить следующие задачи:

- создать базу инфракрасных спектров загрязняющих веществ в составе банка данных дистанционного инфракрасного газоанализатора;
- разработать конструкцию тепловых экранов, системы терморегулирования и обеспечить непрерывную работу приборов за счет использования стационарных источников питания;
- оптимизировать алгоритм функционирования и обработки данных дистанционного зондирования рабочей и санитарно-защитной зоны химически опасных объектов.

При быстрой реакции приборов дистанционного мониторинга менее 0,1 с по каждому направлению, что обеспечивается в настоящее время достигнутым уровнем элементной базы спектрометров, может быть создана высокоэффективная система дистанционного экспресс-контроля воздушного бассейна в зонах ответственности и внутри производственных помещений химически опасных объектов.

Трассовый метод химического мониторинга с применением активной подсветки

Фуфурин И.Л., Морозов А.Н.

ЗАО «Центр прикладной физики» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
igfil@mail.ru

В настоящее время система мониторинга воздушной среды производственных помещений и промышленной зоны предприятий, использующих в рабочем цикле различные опасные химические вещества, основывается на применении средств контроля локального типа. Однако локальные средства химического контроля имеют ряд существенных недостатков:

- необходимость применения набора нескольких детекторов для анализа всего перечня химически опасных веществ;
- низкое быстродействие газоанализаторов (до 2 минут);
- недостаточная в ряде случаев чувствительность обнаружения химических веществ (0,05...100 мг/м³).

По сравнению с локальными методами контроля параметров облаков паров загрязняющих веществ в атмосфере дистанционные методы имеют ряд преимуществ (высокое быстродействие, широкий территориальный охват, возможность одновременного контроля многокомпонентных смесей), что обуславливает перспективность их применения в интересах мониторинга химически опасных объектов. В настоящее время интенсивно развиваются спектрометрические (пассивные) методы дистанционного обнаружения газов и паров веществ в атмосфере. В России на базе ИК Фурье-спектрометра (ФСР) среднего разрешения разработаны приборы для дистанционного обнаружения и определения интегральных концентраций паров химических в открытой атмосфере [1, 2]. Необходимым условием функционирования ФСР является наличие теплового (температурного) контраста между индицируемым облаком и фоновой атмосферой. В связи с этим ФСР применяются, как правило, для наблюдения по наклонным трассам, то есть используется температурный контраст между “холодным” небом и “теплой” приземной атмосферой. Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что при увеличении температурного контраста между анализируемым облаком веществ и фоновой обстановкой (подстилающая поверхность, небосвод и т.п.) чувствительность обнаружения паров веществ значительно повышается.

В таблице 1 приведены экспериментальные данные, подтверждающие увеличение чувствительности спектрометра при увеличении температурного контраста между индицируемым облаком химических веществ и тепловым экраном.

Табл. 1. Результаты эксперимента по оценке влияния величины температурного контраста (ΔT) между индицируемым облаком веществ и тепловым экраном на аналитические характеристики ИК Фурье-спектрометра

№ п/п	Анализируемое вещество	Минимальные обнаруживаемые массовые концентрации анализируемого вещества C , (мг/м ³)			
		$\Delta T = 10^\circ$	$\Delta T = 15^\circ$	$\Delta T = 20^\circ$	$\Delta T = 25^\circ$
1	Аммиак	39	30	21	14
2	Метанол	360	298	190	140

Анализ полученных результатов показывает, что при увеличении температурного контраста на 10 градусов происходит увеличение чувствительности спектрометра в 1,3...2,1 раза в зависимости от величины сечения поглощения анализируемого вещества на аналитической частоте в ИК области спектра. При увеличении температурного контраста до 70...80 градусов возможно обнаружение веществ с концентрациями в диапазоне 0,003...3,0 мг/м³, что является достаточным значением для возможности обеспечения контроля опасности на уровне ПДК рабочей зоны. Применение тепловых экранов для создания температурного контраста наиболее эффективно для длины трассы не превышающей нескольких десятков метров.

Для создания требуемого температурного контраста для трасс протяженностью более 100 м необходимо формирование направленного потока ИК излучения. Инфракрасный излучатель служит для увеличения температурного контраста между фоном и анализируемой газовой смесью. Для этого ИК-излучатель выполнен в виде рефлектора, который концентрирует поток инфракрасного излучения в область расположения спектрометра. В качестве источника ИК излучения выступает небольшое нагретое тело различной формы. Максимум энергетической светимости АЧТ для длин волн порядка 10 мкм, приходится на значение температуры нагревателя порядка 510К. При данной температуре от излучателя будет наибольшая энергетическая отдача, необходимая для дистанционного химического анализа в спектральном диапазоне 7-14 мкм.

Экспериментально показано, что применение зеркального параболического рефлектора с излучателем в виде нихромовой нити размера порядка 1 см позволяет проводить идентификацию пленочных имитаторов на трассе длиной порядка 170 м.

Литература

1. Дворук С.К., Кочкиков И.В., Морозов А.Н., Павлов Д.А. и др. Применение Фурье-спектрометра для определения концентраций загрязняющих веществ в атмосфере // Оптический журнал. 2000. Т. 67, №3, С.37-42

2. И.В. Кочиков, А.Н. Морозов, С.И. Светличный, И.Л. Фуфурин
Распознавание веществ в открытой атмосфере по единичной интерферограмме
фурье-спектрорадиометра // Опт. и спектр. 2009. Т. 106. №5, С. 743-749

Алгоритм идентификации веществ по набору спектров вторичного излучения

Морозов А.Н., Васильев Н.С.

Московский Государственный Технический Университет им Н.Э. Баумана,
г.Москва

nickliamg@gmail.com

Аннотация. Рассматриваются методики идентификации веществ по спектрам вторичного излучения. Задача относится к обратным задачам спектроскопии и возникает при создании приборов анализаторов химического состава образцов на поверхностях и в воздушной среде. Предлагается способ увеличения надёжности и селективности таких приборов путём использования набора из разнородных спектров вторичного излучения исследуемых веществ.

Введение. Методы идентификации веществ по электромагнитным спектрам предложены ранее при создании приборов экспресс анализа состава атмосферных загрязнений [1-3]. В этих работах изучались спектры прохождения или излучения газов в ИК области и их идентификация. В работах [4-6] предложен алгоритм работы прибора по идентификации веществ на подстилающей поверхности в конденсированной фазе. В этом приборе анализируются спектры вторичного излучения люминесценции, получаемые при помощи статического Фурье-спектрометра видимого и ближнего ультрафиолетового диапазона.

В работе [6] предложено для идентификации веществ использовать метод наименьших квадратов, где минимизируемый функционал выглядит следующим образом:

$$\Phi = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \left(a(\omega) - \sum_{i=1}^N x_i b_i(\omega) \right)^2 d\omega, \quad (1)$$

здесь ω — циклическая частота, $a(\omega)$ — регистрируемый спектр, $b_i(\omega)$ — i -й спектр вещества из набора по которому осуществляется поиск. В роли аппроксимирующей функции выступает сумма спектров с весовыми коэффициентами x_i . Зная концентрации спектров b_i по величинам x_i в точке $\Phi(x_{\min})$ можно оценить концентрацию их примесей в исследуемом веществе.

По найденному значению $\Phi(x_{\min})$ находится коэффициент схожести, рассчитываемый по формуле:

$$\rho = \sqrt{1 - \frac{\Phi(x_{\min})}{\Phi(0)}}. \quad (2)$$

Если используется несколько спектров одной и той же физической природы с соизмеримыми интенсивностями, то функционал (1) можно модифицировать:

$$\Phi(c) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \int_{\omega_{j1}}^{\omega_{j2}} (a_j(\omega) - x b_j(\omega))^2 d\omega, \quad (3)$$

$$\Phi(c) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{1}{A_j} \int_{\omega_{j1}}^{\omega_{j2}} (a_j(\omega) - x b_j(\omega))^2 d\omega, \quad (4)$$

$$\Phi(c) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{1}{B_j} \int_{\omega_{j1}}^{\omega_{j2}} (a_j(\omega) - x b_j(\omega))^2 d\omega, \quad (5)$$

Задача идентификации веществ сводится к экстремальной задаче поиска минимума функционалов вида (3), (4) и (5).

Эксперимент. Для проверки работоспособности метода, а так же для определения наиболее эффективного для идентификации веществ выражения функционала использовались спектры, получаемые на статическом Фурье спектрометре прибора экспресс-анализатора конденсированных веществ на подстилающей поверхности (см. [4,5]). В качестве базы данных использовались спектры тестовых веществ (см. таблица 1). После оптимизации строилась матрица коэффициентов схожести (2).

В таблице 1 представлены результаты по распознаванию тестовых веществ. Символом «+» помечены результаты правильной идентификации веществ; символом «-» обозначены ложные срабатывания.

Таблица 1

идентифицируемое вещество	результаты			
	используемый функционал			
	(1)	(3)	(4)	(5)
K_2CrO_4	+	+	+	+
<i>РОРОР</i>	+	+	+	+
<i>РРО</i>	+	+	+	+
Ацикловир	-	-	+	-
Краситель	+	+	+	-
Стильбен	-	-	-	-
Триптофан	+	+	+	+

Из таблицы видно, что функционал вида (4) позволяет получить более надёжный результат в случае сильно зашумлённых спектров, чем предложенный в работах [4-6].

Выводы. Получен оптимальный вид функционала в методике вычисления меры схожести набора спектров исследуемого вещества с веществами из базы данных. Экспериментально проверено преимущество предложенной методики. Полученные результаты могут быть использованы при создании приборов экспресс анализа химического состава веществ.

Литература

1. A compact fourier spectrometer for remote analysis of gaseous media/ Gorchakovski S.N., Ivlev O.A., Kochikov I.V., Maznichko A.A., Morozov A.N., Palatov Yu.A., Svetlichny S.I., Tabalin S.E.// Оптический журнал. 1998. Т. 65. в.,– 6. С. 86.

2. Проблема идентификации и определения концентраций загрязняющих веществ с помощью фурье-спектрометра/ Бойко А.Ю., Григорьев А.А., Дворук С.К., Корниенко В.Н., Кочиков И.В., Лельков М.В., Мацюк Г.В., Морозов А.Н., Павлов А.Ю., Светличный С.И., Табалин С.Е., Шишкин Г.В., Шлыгин П.Е.// Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки. 2004. в.,– 1. С. 26.

3. Распознавание веществ в открытой атмосфере по единичной интерферограмме фурье-спектрометра/ Кочиков И.В., Морозов А.Н., Светличный С.И., Фуфурин И.Л.// Оптика и спектроскопия. 2009. Т. 106. в.,– 5. С. 743-749.

4. Статический фурье-спектрометр видимого диапазона/ Бойко А.Ю., Голяк И.С., Голяк И.С., Дворук С.К., Доровских А.М., Есаков А.А., Корниенко В.Н., Косенко Д.В., Кочиков И.В., Морозов А.Н., Светличный С.И., Табалин С.Е.// Известия Российской академии наук. Энергетика. 2010. в.,– 2. С. 12-21.

5. Статический фурье-спектрометр видимого и ближнего ультрафиолетового диапазонов спектра/ Бойко А.Ю., Голяк И.С., Голяк И.С., Дворук С.К., Доровских А.М., Есаков А.А., Корниенко В.Н., Косенко Д.В., Кочиков И.В., Морозов А.Н., Светличный С.И., Табалин С.Е.// Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки. 2009. в.,– 3. С. 10-28.

6. Методика получения и обработки спектральной информации с помощью статического фурье-спектрометра/ Глаголев К.В., Голяк И.С., Голяк И.С., Есаков А.А., Корниенко В.Н., Кочиков И.В., Морозов А.Н., Светличный С.И., Табалин С.Е.// Оптика и спектроскопия. 2011. Т. 110. в.,– 3. С. 486-492.

Бортовой инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2: характеристики летного образца

Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Мащицкий Ю.П., Никулин А.Г., Монахов Д.О.,
Козлов Д.А., Болмосов И.В., Козлов И.А.
ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», г. Москва
Архипов С.А., Целиков В.А.
ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»
Романовский А.С.
Научно-исследовательский институт информатики и систем управления
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Бортовой инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2 предназначен для измерения спектров исходящего излучения атмосферы Земли и служит для обеспечения нужд оперативной метеорологии и климатологии в части получения следующих видов информации: вертикальные профили температуры и влажности в тропосфере, общее содержание и высотное распределение озона, концентрации малых газовых составляющих, температура подстилающей поверхности и др. Прибор ИКФС-2 разрабатывается в составе космического аппарата «Метеор-М» №2 (солнечно-синхронная орбита, средняя высота 835 км). К настоящему моменту летный образец прибора прошел наземную отработку и поставлен Заказчику (ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

Наземная калибровка прибора ИКФС-2 связана с определением всех параметров и характеристик прибора, связывающих измеряемые прибором интерферограммы с истинным спектром входного излучения, и проводится на основе регистрации излучения тестовых объектов (эталонное черное тело с изменяемой в широком диапазоне температур; монохроматическое излучение лазерных источников). В ходе наземной калибровки получены следующие характеристики прибора:

- рабочий спектральный диапазон (667...2000) см^{-1} ;
- спектральное разрешение (ширина аппаратной функции по уровню 0.5 от значения в максимуме) 0.4 см^{-1} ;
- погрешность измерения спектральной яркости объекта в рабочем диапазоне спектра в терминах эквивалентной температуры, за исключением областей (1525...1570) см^{-1} и (1925...2000) см^{-1} в диапазоне температур (253...323) К, не превышает 0,5 К. В спектральном диапазоне (830...910) см^{-1} погрешность составляет 0,3 К, что несколько меньше требования технического задания (0,5 К);
- пороги обнаружения NESR составляют:
в центре полосы поглощения CO_2 (667 см^{-1}) – $0,23 \text{ мВт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{см}$, в области (700...1000) см^{-1} – $0,1 \text{ мВт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{см}$, в области (1620...2000) см^{-1} – (0,3...0,2) $\text{мВт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{см}$, что несколько ниже требуемых техническим заданием;

– угловое поле зрения по уровню 0,5 составляет 30 мрад, что соответствует размеру пиксела на поверхности Земли 25 км.

Проведены измерения нисходящих потоков излучения атмосферы и сопоставлены с литературными данными.

Инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-3 для КА «Метеор-МП»

Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Никулин А.Г., Монахов Д.О., Козлов Д.А.,
Болмосов И.В., Козлов И.А.

ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», г. Москва

Архипов С.А., Целиков В.А., Кушнарев К.Г., Тышкунев Н.В.

ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»

Романовский А.С.

Научно-исследовательский институт информатики и систем управления
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Аппаратура ИКФС-3 разрабатывается в составе гидрометеорологического и океанографического космического комплекса мониторинга Земли четвертого поколения «Метеор-МП». Инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-3 предназначен для измерения спектров исходящего излучения атмосферы Земли и служит для обеспечения нужд оперативной метеорологии и климатологии в части получения следующих видов информации: вертикальные профили температуры и влажности в тропосфере, общее содержание и высотное распределение озона, концентрации малых газовых составляющих, температура подстилающей поверхности и др. На данном этапе разработан эскизный проект, в рамках которого определены основные технические характеристики изделия.

Рабочий спектральный диапазон ИКФС-3 ($645\text{--}2760\text{ см}^{-1}$, $15.5\text{--}3.6\text{ мкм}$) разбивается на три спектральных поддиапазона: LW – $645\text{--}1200\text{ см}^{-1}$, MW – $1200\text{--}2000\text{ см}^{-1}$, SW – $2000\text{--}2760\text{ см}^{-1}$. Спектральное разрешение прибора (ширина аппаратной функции по уровню 0.5): LW- 0.35 см^{-1} , MW- 0.45 см^{-1} , SW- 0.55 см^{-1} . Пространственное разрешение в надире – 15 км. Масса прибора – не более 210 кг, энергопотребление в рабочем режиме – не более 120 Вт, поток информации – не более 3.5 Мб/с, габариты – 800мм x 800мм x 1100мм.

ИКФС-3 представляет собой моноблок, состоящий из оптико-механического блока, блока обработки, управления и питания – блока электроники и комплекта кабелей их соединяющих. Оптико-механический блок состоит из блока сканера, блока интерферометра, телескопа, блока холодного и радиационного холодильника.

Работа выполнена в рамках ОКР «Метеор-МП – ИКФС-3».

Многоцелевой фурье-спектрометр космического базирования. Экспериментальный образец

Вагин В.А., Жарков А.В., Крадецкий В.В., Мошкин Б.Е., Романовский А.С.,
Хорохорин А.И., Шилов М.А.

НТЦ уникального приборостроения РАН, г. Москва

valamann@gmail.com

В докладе рассмотрен разработанный и изготовленный многоцелевой фурье-спектрометр МЦФС. Он является дальнейшим развитием первого отечественного метеорологического фурье-спектрометра ИКФС-2, предназначенного для измерений параметров атмосферы и поверхности Земли в составе космического аппарата Метеор-М №2. МЦФС отличается от существующих приборов такого класса рядом особенностей, способствующих расширению круга решаемых задач.

На первом этапе работы изготовлен и испытан экспериментальный образец МЦС-Э, на котором отработаны новые элементы и технические решения. Это фурье-спектрометр на базе интерферометра Майкельсона в варианте «двойной маятник» со светоделителем из кристаллического КВг и с полыми триэдрами (апертура 2,5 дюйма) в качестве ретрорефлекторов. Основные характеристики спектрометра приведены ниже.

1. Используется 16-элементный КРТ-приемник, в виде матрицы 4x4, охлаждаемой до 78 К. Матричный приёмник позволяет исключить влияние облаков, случайно попадающих в поле зрения отдельного элемента, а также повысить отношение сигнал/шум при усреднении результатов измерений. Повышение пространственного разрешения требуется также для решения задач, связанных с измерением спектров земной поверхности и для проведения картирующей спектрометрии высокого спектрального разрешения. Спектральный диапазон этого канала - (5 ...15) мкм. Поле зрения матричного приёмника 50 мрад, при поле зрения каждого элемента 10 мрад.

2. Имеется дополнительный спектральный канал, расширяющий спектральный диапазон до (2,5...25) мкм, в котором установлен одноэлементный пироэлектрический приемник. Угловой диаметр поля зрения одноэлементного приёмника 33 мрад.

3. Используется программное изменение спектрального разрешения от $0,25 \text{ см}^{-1}$ до 5 см^{-1} при изменении максимальной оптической разности хода от 4 см до 0,2 см.

4. Диапазон изменения частоты референтного канала выбирается от 9,2 кГц до 90 кГц, что позволяет изменять время записи 16-ти двухсторонних интерферограмм и производить их обратное фурье-преобразование и расчёт спектров за время от 0,5 до 10 сек.

Выбор для каждой научной задачи оптимальных значений перечисленных выше параметров уменьшает объём передаваемой информации, увеличивает число наблюдаемых объектов, увеличивает отношение сигнал/шум в

получаемом спектре. Все эти меры необходимы для эффективного переацеливания на решение той или иной геофизической или какой-либо прикладной задачи.

5. Система наведения (сканер) поворачивает ось поля зрения прибора на заранее заданные углы в интервале $0^{\circ} \dots 63^{\circ}$ в обе стороны от трассы спутника в заранее заданной последовательности, а также на космос и на калибровочный инфракрасный излучатель. Скорость вращения зеркала составляет 360° в секунду.

В системе сканирования поперёк трассы полёта имеется узел компенсации смаза, позволяющего длительное время, в течение до 10 секунд, удерживать поле зрения прибора на выбранной точке за счёт наклона линии наблюдения вдоль трассы в пределах $\pm 7^{\circ}$.

6. Для калибровки спектрорадиометра в полёте используется излучатель типа «чёрное тело» со встроенным нагревателем.

7. Масса экспериментального образца составляет 24 кг.

8. Питание – 27 В.

Описаны оригинальные решения датчиков крайних положений ретрорефлекторов, привода маятника, конструкции калибровочного излучателя, юстировочных и фиксирующих элементов светоделителя, системы адаптивного управления двигателем сканера, конструкции объектива.

На рисунке 1 приведена фотография прибора. Корпус спектрометра 1 имеет форму усечённого цилиндра. На плоской лицевой панели, сопряжённой с цилиндрической обечайкой, расположено входное окно и закреплён сканер 2. Вся сборка подвешивается на четырёх амортизаторах 4. Габариты спектрометра со сканером с учётом амортизаторов и выступающего вентилятора 5 (только в данном образце) криогенного холодильника 3, составляют $600 \times 480 \times 360$ мм.

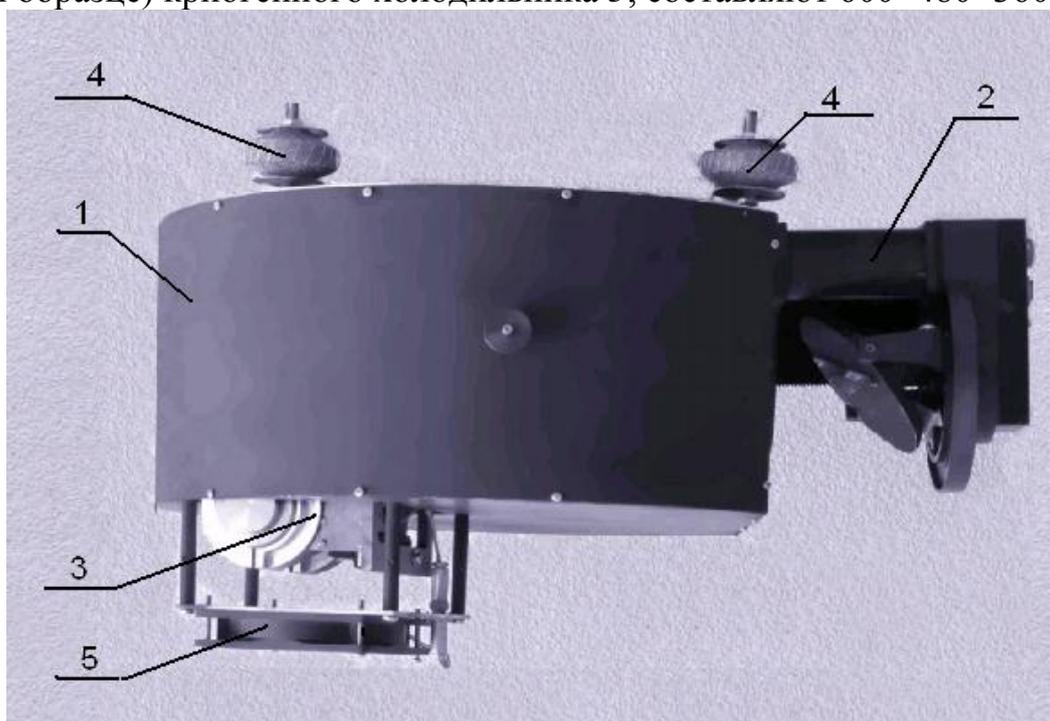


Рисунок 1. Фотография прибора МСЦ-Э

Многоэлементный фурье-спектрометр, работающий в ИК-диапазоне

Королёв П. А., Карфидов А. О.

ЗАО «Центр прикладной физики МГТУ им. Н.Э.Баумана», г. Москва

Миронов А. И.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

В работе рассматривается оптическая схема и принцип действия ИК фурье-спектрометра [1] с многоэлементным фотоприемным устройством. В основе оптической системы лежит классический двухлучевой интерферометр Майкельсона [2], состоящий из двух зеркал (одно из которых подвижное) и светоделителя.

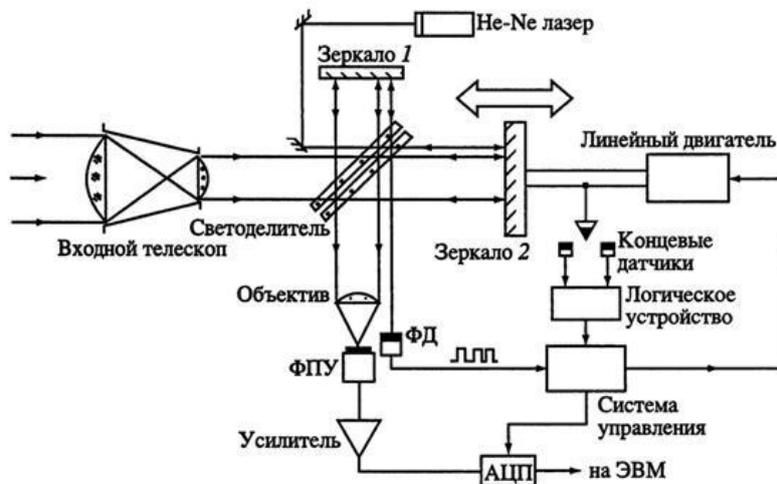


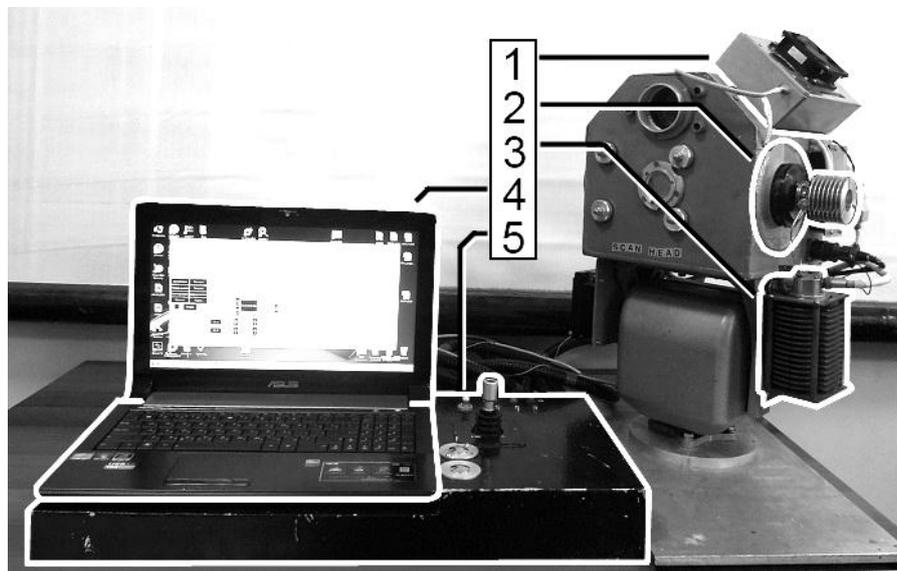
Рис. 1. Типичная блок-схема динамического фурье-спектрометра

Типичная блок-схема фурье-спектрометра на основе интерферометра Майкельсона [3] (рис. 1) состоит из входного коллиматорного телескопа (или объектива), собственно интерферометра, камерного объектива, фотоприемного устройства, блоков систем оцифровки сигнала, системы управления и стабилизации скорости перемещения подвижного зеркала. Сформированный телескопом параллельный входной анализируемый пучок света попадает на светоделитель, где в идеальном случае делится на два пучка с отношением интенсивностей 1:1. После светоделителя прошедший и отраженный пучки света попадают на зеркала интерферометра. Выходящее из интерферометра излучение фокусируется камерным объективом на фоточувствительную площадку многоэлементного фотоприемного устройства (ФПУ).

Основополагающие характеристики, такие как чувствительность и обнаружительная способность всего аппаратного комплекса (фурье-спектрометр, управляющие механизмы и пр.) напрямую зависят от фотоприемного устройства (ФПУ). Именно оно определяет рабочий диапазон спектра и зону видимости (в ряде случаев и скорость сканирования), а так же соотношение сигнал/шум в обрабатываемом сигнале и, как следствие, величину

минимально обнаружимой концентрации при заданных параметрах трассы измерений.

Описание макетного образца ИК фурье-спектрометра



- 1 – блок обработки данных (БОД); 2 – многоэлементное фотоприёмное устройство;
3 – криогенная камера Стирлинга с радиатором; 4 – персональный компьютер;
5 – блок управления

Рис. 2. Макетный образец панорамного фурье-спетрорадиометра

Разработанный панорамный ИК фурье-спектрометр (рис. 2.) предназначен для:

- анализа окружающей среды охватывает широкий угол обзора;
- исследования пространственного распределения концентрации исследуемого вещества и его поведение во времени;
- проведения измерений и вывода результатов с высокой степенью точности.

На основе макетного образца в дальнейшем будет создан прототип серийного изделия.

Литература

1. Белл Р. Дж., Введение в фурье-спектроскопию, пер. с англ., М., 1975.
2. Малышев В. И., Введение в экспериментальную спектроскопию, М., 1979.
3. Морозов А.Н., Светличный С.И. Основы фурье-спектрометрии. М., 2006.

К улучшению двумерных интерференционных картин, получаемых со статического фурье-спектрометра

Голяк И.С, Морозов А.Н.

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана,
г. Москва

gwynbleidd_85@mail.ru

Актуальной задачей внелабораторного экспресс-анализа является обеспечение химической безопасности на объектах любого уровня опасности и степени важности. Эффективным решением в данной области представляется создание портативных микроанализаторов с возможностью беспробоотборного анализа. Удачным вариантом такого анализатора является микроанализатор [1] на основе статического Фурье-спектрометра вместе с алгоритмом обработки получаемых с него двумерных интерференционных картин [2]. В процессе работы и исследований, проводимых на данном приборе, были выявлены невысокая эффективность ПЗС-камеры с чересстрочной разверткой и не оптимальность затрачиваемого алгоритмом времени на обработку, не в полной мере соответствующих уровню современной технологии.

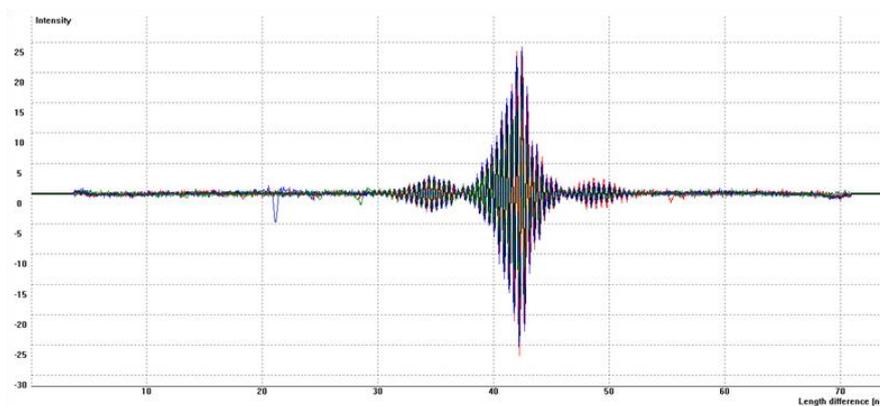
В данном докладе обсуждаются улучшения на основе повышения эффективности работы ПЗС-камеры и алгоритма обработки двумерных интерференционных картин.

В качестве замены ПЗС-камеры с чересстрочной разверткой были отобраны 2 ПЗС-камеры с прогрессивной разверткой и динамическим диапазоном 12 бит: ES experts BMR-1400U с разрешением 1360x1040 пикселей и охлаждаемая VS285-USB с разрешением 1393x1040. Для проверки их эффективности была проведена серия экспериментов по накоплению изображений по времени, в ходе которой выяснилось, что при работе камер в режиме накопления, более гладкий спектр получается при использовании камеры VS285-USB. Данный выигрыш обусловлен применением в данной камере охлаждения на основе ячейки Пельтье, что позволяет снизить темновой ток в матрице. Отрицательным эффектом данного решения являются конструктивные и эксплуатационные проблемы, связанные с запотеванием защитных стекол и сброса тепла с горячего спая термоэлектрического холодильника.

Кроме этого использование данных камер приводит к повышению объема входных данных в 3 раза, что влечет за собой большую нагрузку на центральный процессор и алгоритм. Для решения данной проблемы было проведено исследование работы алгоритма по времени, затрачиваемому на обработку каждого этапа, в частности было выявлено, что большая его часть уходит на этап низкочастотной фильтрации (75%). Для оптимизации по времени данного этапа вместо низкочастотной фильтрации была реализована следующая процедура. По каждой строке двумерной интерферограммы рассчитывалась полиномиальная кривая, коэффициенты которой подбирались

по усредненным точкам в окрестностях начала, середины и конца данной строки интерференционной картины. Затем полученная кривая вычиталась из этой строки кадра. В результате данной операции был получен существенный выигрыш по времени, позволивший добиться выполнения алгоритма решения задачи менее чем за 1 сек. на более экономичных процессорах. Также положительным эффектом данной замены оказалось улучшение коэффициента корреляции (рис. 1).

а) $\rho = 0.995$



б) $\rho = 0.971$

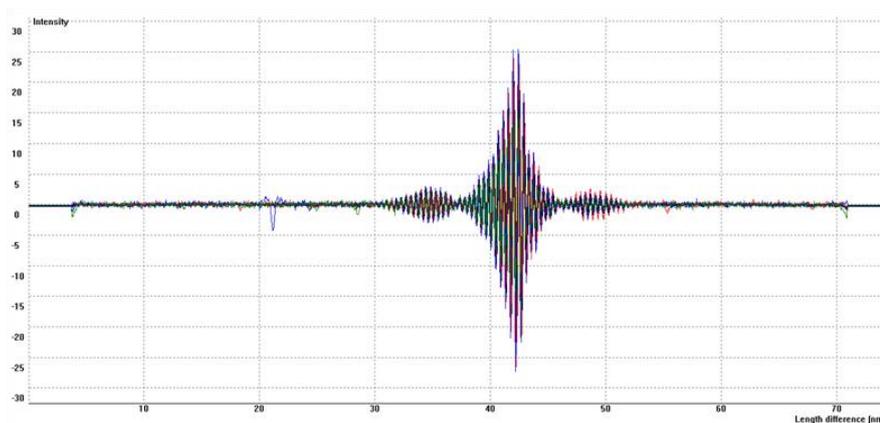


Рис. 1. Интерференционные картины для вещества антрацен при возбуждении УФ светодиодом с длиной волны 280 нм и коэффициент корреляции ρ : а) при интерполяции многочленом Лагранжа 1й степени; б) при низкочастотной Фурье-фильтрации.

Литература

1. Бойко А.Ю., Голяк Иг.С., Голяк Ил.С., Дворук С.К, Доровских А.М., Есаков А.А., Корниенко В.Н., Косенко Д.В., Кочиков И.В., Морозов А.Н., Светличный С.И., Табалин С.Е. // Известия РАН. Энергетика. 2010. № 2. С. 12-21.
2. Глаголев К.В., Голяк Иг.С., Голяк Ил. С., Есаков А.А., Корниенко В.Н., Кочиков И.В., Морозов А.Н., Светличный С.И., Табалин С.Е. // Опт. и спектр. 2011. Т. 110. № 3. С. 486-492.
3. Морозов А.Н., Светличный С.И. Основы Фурье-спектрометриии. Инт-т энергетических проблем хим. физики РАН. М.: Наука, 2006. 275 с.

Рефрактивные сенсоры на основе глобулярных фотонных кристаллов

Горелик В. С., Литвинова А. О.

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана,
г. Москва

Глобулярные фотонные кристаллы – это современные композитные материалы, характеризующиеся кристаллической структурой с периодом решетки, существенно превышающим атомные размеры. Они могут быть использованы для проведения количественных и качественных анализов химических соединений основываясь на принципах работы рефрактивного сенсора. Рефрактивным сенсором называют устройства, позволяющие устанавливать тип молекулярного соединения по изменению положения стоп – зон фотонного кристалла в результате введения в его поры вещества с заданным коэффициентом преломления. В настоящее время существуют голографические сенсоры [1], состоящие из периодически расположенных диэлектрических слоёв. Недостатком таких сенсоров является зависимость их характеристик от условий введения вещества между слоями.

В представленном тезисе приведены результаты проделанной работы по изучению свойств глобулярного фотонного кристалла как рефрактивного сенсора.

В работе были изучены глобулярные фотонные кристаллы с диаметрами глобул 195 – 700 нм. Исследования проводились с пластинами $2 \times 10 \times 10$ мм³ с ориентацией поверхности (111). В качестве источников вторичного возбуждения использовались галогенная и дейтериевая лампы. Поры искусственного опала заполняли различными веществами, такими как вода, этиловый спирт C_2H_5OH и йодид калия KI. Установка для изучения спектров отражения состояла из источника излучения, световодов, системы фокусировки, образца, миниспектрометра и компьютера, для обработки полученных статистических данных.

В ходе эксперимента установили, что при пропитке опалов жидкостью ширина запрещенной зоны фотонного кристалла сужается, положение пика отражения смещается в длинноволновую область. Положение стоп-зоны соответствует положению максимума интенсивности спектральной картины. На Рис. 1 а-в приведены для сравнения спектры отражения от поверхности глобулярного фотонного кристалла, заполненного воздухом или этиловым спиртом. Положение стоп-зон смещается, так как изменяется коэффициент преломления среды, от которой происходит отражение. При заполнении глобулярного фотонного кристалла этиловым спиртом положение стоп-зоны изменяется от 509,5 нм до 548,3 нм (3а), а при заполнении водой положения стоп – зон соответствует 542,7 нм, смесью этилового спирта и йодистого калия – 567,0 нм (3б), воздухом 644,1 нм и водой 676,5 нм (3в).

Полученные экспериментальные результаты по спектрам отражения от поверхности (111) фотонного кристалла согласуется с формулой Брэгга [2] для спектрального положения дифракционного максимума:

$$m\lambda_{\max} = 2\sqrt{\frac{2}{3}}Dn_{\text{eff}}; \quad m = 1, 2, \quad (1)$$

$$\text{где } n_{\text{eff}} = \sqrt{n_1^2\beta + n_2^2(1-\beta)}. \quad (2)$$

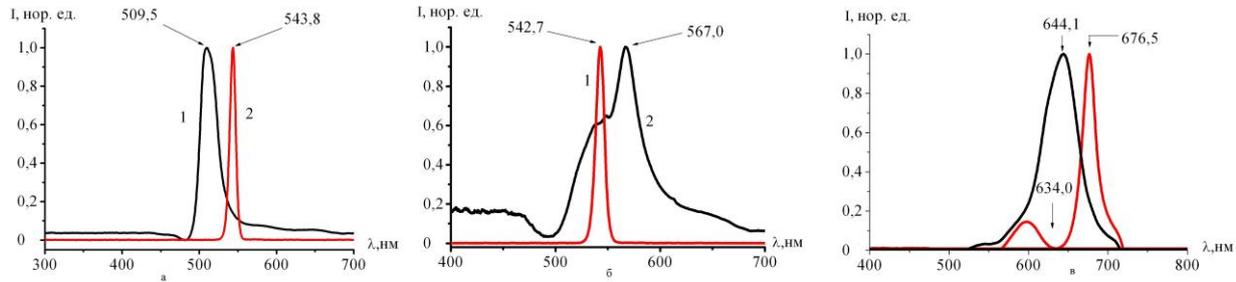


Рис. 1. Спектр отражения от поверхности глобулярного фотонного кристалла, заполненного различными веществами: а - воздухом и этиловым спиртом (509,5нм и 543,8нм); б - водой и смесью этилового спирта и йодистого калия(542,7нм и 567,0нм); в - воздухом и водой (644,1нм и 676,5нм).

В формулах (1,2) n_1 , n_2 – показатели преломления кремнезёма и внедрённого в поры опала вещества соответственно (n_2), β – коэффициент заполнения объема кристалла кремнеземом, m – номер стоп-зоны, D – диаметр глобулы.

На рис. 2 наблюдается существенное отличие вида спектров эталонного (заполненного воздухом) и анализируемого (заполненного водой) образцов (для Рис.1в).

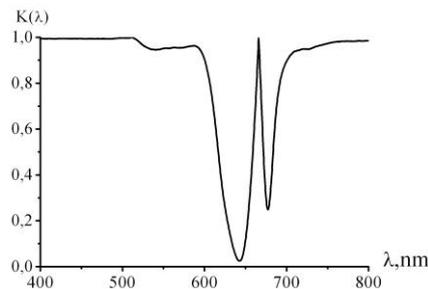


Рис. 2. Разностная функция $K_W^A(\lambda)$ опала, заполненного водой(W), по отношению к опалу, заполненного воздухом (A), в диапазоне длин волн $\Delta\lambda=560\dots725$ нм. Интегральный коэффициент соответствия: $K = 0,93$.

Таким образом, при сравнении образцов опалов, заполненных различными веществами, с исходными фотонными кристаллами построены разностные спектры. Выявлено, что при изменении эффективного показателя преломления, т. е. при введении различных веществ, диаметра глобул искусственного опала наблюдается спектральный сдвиг стоп-зон и изменение их ширины. Нами была показана возможность создания рефрактивного сенсора

молекулярных структур, способного регистрировать сравнительно небольшие изменения в молекулярном составе исследуемых соединений, введённых в поры глобулярного фотонного кристалла.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (Государственный контракт 16.513.11.3116) и проектов РФФИ №№ 10-02-00293, 11-02-00164, 11-02-12092, 12-02-00491, 12-02-90422.

Литература

1. Крайский А. В., Постников В. А., Султанов Е. Е., Хамидулин А. В. Голографические сенсоры для диагностики компонентов раствора. // «Квантовая электроника». – 2010г. - №2. – с. 178.
2. Gorelik V.S. Optics of Globular Photonic Crystals. // Laser Physics. – 2008г. – V.18 – № 12, – p .386.

Особенности проектирования и разработки программного обеспечения для задач управления и обработки сигналов фурье-спектрометров космического базирования

Баронкин А.С., Платанов С.Ю., Романовский А.С., Хохлов С.А.
 Научно-исследовательский институт информатики и систем управления
 МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
s.a.khokhlov@gmail.com

В докладе рассматриваются особенности проектирования и разработки программного обеспечения (ПО) управления и обработки сигналов инфракрасных фурье-спектрометров (ИКФС) космического базирования для вычислительных блоков аппаратно-программных комплексов (АПК) ИКФС. К числу задач ПО относятся следующие:

- приём и обработка сигналов управления с космического аппарата (КА);
- реализация циклограммы управления ИКФС;
- самодиагностика и переключение между основными и резервными комплектами;
- управление системой поддержания температуры с точностью 0,15 К;
- управление двигателями триэдров с компенсацией влияния внешних механических воздействий, с точностью поддержания номинального значения скорости перемещения триэдров 0,1%;
- управление двигателем сканера с точностью установки угла положения зеркала не хуже 0,3°;
- синхронизация блоков АПК ИКФС и задач управления;
- сбор, предварительная обработка и преобразование сигналов с одноэлементного фотоприемника ИКФС;
- синхронизация вычислительных блоков АПК ИКФС при формировании пакетов целевой информации;
- многоуровневая передача целевой информации;
- сжатие, кодирование и контроль целостности целевой информации.

В работе предложены следующие алгоритмы и проведена оценка вариантов их реализации:

- сбор, предварительная обработка и преобразование сигналов с многоэлементного фотоприемника ИКФС (с учетом ограничений КА на поток целевой информации);
- управление компенсатором момента двигателя триэдров;
- управление voicecoil-приводом триэдров;
- управление двигателем сканера в микрошаговом режиме работы;
- компенсация «смаза», связанного с движением аппарата.

Результаты работы используются при создании АПК ИКФС-2 (КА «Метеор-2»), а также АПК ИКФС-3 (КА «Метеор-МП»).

Тепловая модель бортовой аппаратуры высокого спектрального разрешения

Монахов Д.О., Ушаков Н.Н.
ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»

В работе приведен метод разработки и проверки тепловой модели бортовой аппаратуры высокого спектрального разрешения (спектральной аппаратуры).

Ввиду неопределенности оптических свойств поверхностей, величин контактной проводимости в условиях вакуума, неопределенности теплоемкости отдельных составных частей сторонних производителей, такая модель не может быть создана без проведения ТВИ в условиях, моделирующих натурные.

Разработанная тепловая модель должна удовлетворять 2 основным режимам работы бортовой аппаратуры – в условиях наземной отработки на стенде и в условиях космического пространства. Поэтому по результатам наземных тепловакуумных испытаний проводится коррекция этой тепловой модели.

Для проверки метода построения тепловой модели спектральной аппаратуры выбран бортовой инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2 для КА «Метеор-М» №2. К расчетной модели предъявляются высокие требования по точности – не хуже $\pm 0.75^\circ\text{C}$ по абсолютному значению температуры, $\pm 0.2^\circ\text{C}$ по изменению температуры. Столь высокие требования по точности вызваны тем, что тепловой режим прибора определяет величину его собственного излучения. Собственное излучение ИКФС-2 должно быть стабилизировано с точностью, которая соответствует отклонению температуры прибора $\pm 0.5^\circ\text{C}$ за период между измерениями собственного излучения. Для ИКФС-2 этот период составляет не более 15 минут.

Такая тепловая модель ИКФС-2 разработана. Для математической реализации выбрана прикладная программа ТЕРМ разработки ФГУП «ЦНИИмаш». Для проверки и коррекции разработанной тепловой модели проведены тепловакуумные испытания аппаратуры ИКФС-2. При задании известных справочных данных по контактным сопротивлениям и теплофизическим свойствам применяемых материалов, соответствия расчетных и экспериментальных данных не было достигнуто.

На основании сопоставления расчетных и экспериментальных данных модель доработана. Обеспечено ее соответствие экспериментальным данным с требуемой точностью. К полученной модели применены граничные условия орбитального полета. Получены значения температур ИКФС-2 на всех режимах работы. С учетом этих значений откорректирован алгоритм работы СТР ИКФС-2 и внесены изменения в конфигурацию пассивных элементов системы обеспечения теплового режима аппаратуры ИКФС-2.

Аналитическая методика оценки радиационных нагрузок от ионизирующих излучений космического пространства на элементы космической аппаратуры дистанционного зондирования Земли.

Архипов С.А., Зубко А.В., Лалакин А.В.
ОАО «Красногорский завод им. С.А.Зверева»
a.zubko@zenit-kmz.ru

Развитие космической аппаратуры дистанционного зондирования Земли, увеличение сроков активного существования и расширение диапазона орбит приводит к росту эффектов воздействия факторов космического пространства и критичности их влияния на работоспособность аппаратуры. Корректный учет влияния условий функционирования, в том числе дозовых эффектов от ионизирующих излучений космического пространства (ИИКП) на работоспособность является одним из важнейших этапов разработки аппаратуры. В настоящее время создан ряд достаточно сложных программных комплексов для расчетов величин поглощенных элементами аппаратуры доз от ИИКП с детальным учетом конструкции. Однако существует потребность в достаточно простых и эффективных аналитических методиках для проведения оценок соответствующих доз.

Как правило, формой задания в ТЗ на аппаратуру требований по радиационной стойкости является таблица значений величин поглощенных доз в зависимости от дискретного ряда значений толщин сферической защиты для различных воздействующих факторов ИИКП. В общем случае, для проведения расчетов необходима непрерывная аппроксимация зависимостей величин доз от толщины защиты.

Предлагаемая методика расчета содержит два основных этапа:

1. непрерывная аналитическая аппроксимация дискретных дозовых зависимостей факторов ИИКП;
2. вычисление величин поглощенных доз ИИКП за защитными экранами типовых геометрических форм.

На первом этапе производится аппроксимация дозовых зависимостей факторов ИИКП непрерывными функциями толщины экрана z , являющимися суммой слагаемых следующего общего вида:

$$f(z) = \frac{p \cdot z^\alpha}{1 + q \cdot z^\beta} \cdot e^{c \cdot z^\gamma} \quad (1)$$

Выражения вида (1) являются обобщениями известных в теории приближенных вычислений, так называемых, аппроксимаций Паде. Аналитические свойства дозовых зависимостей ИИКП вида (1) обобщают их характеристики в нормативной литературе. Выбор значений коэффициентов аппроксимации $(p, q, c, \alpha, \beta, \gamma)$ производится методом наименьших квадратов для каждого из факторов ИИКП при помощи стандартной программы инженерных вычислений (в данном случае - Mathcad 15).

На втором этапе методики, для расчета величин поглощенной дозы в некоторой точке, элементы конструкции, которые являются защитными

экранами по отношению к данной точке, в различных телесных углах, аппроксимируются экранами типовых геометрических форм или их совокупностью.

Данная методика позволяет рассчитать защитные свойства экранов следующих типовых форм: плоские экраны постоянной или переменной толщины с аналитически заданной границей (прямоугольники, трапеции, эллипсы и др.), сегменты сферы, цилиндрические оболочки и ряд других.

Величина дозы D_n от ИИКП, приходящего в данную точку через защитный экран в телесном угле Ω_n с вершиной в данной точке, вычисляется как непрерывный предел метода секторирования, интегралом вида:

$$D_n = \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega_n} f(z(\theta, \varphi)) \cdot d\omega \quad (2)$$

где интегрирование ведется в сферической системе координат (θ, φ) , функция $z(\theta, \varphi)$ описывает толщину типового защитного экрана в данном направлении (условно показано на рисунке 1), а функция $f(z)$ имеет вид (1). При необходимости и для удобства расчетов интеграл (2) может быть записан и в другой системе координат (например, прямоугольной или цилиндрической).

Полная величина поглощенной дозы в данной точке записывается как сумма доз D_n по всем телесным углам Ω_n с вершиной в данной точке.

Интегрирование в выражении (2) производится численно на основе аналитического выражения для функции $f(z(\theta, \varphi))$ при помощи стандартной программы инженерных вычислений (в данном случае - Mathcad 15).

Предлагаемая методика была апробирована на данных ОСТ 134-1044-2007, в котором для заданных высот орбит и толщин защиты приведены значения доз изотропного ИИКП из полупространства как для полусферического, так и для полуплоского защитного экранов. Апробация заключалась в вычислении по данной методике величин доз за полуплоским экраном по данным для полусферического экрана и последующего сравнения соответствующих величины вычисленного и табличного значения доз.

Вычисления проводились для толщин экранов 0.01, 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 10.0 г/см², орбит высотой 400, 700 и 1000 км для следующих факторов ИИКП – электронов и протонов ЕРПЗ, протонов СКЛ. Расхождение между табличными данными ОСТ 134-1044-2007 и вычисленными по данной методике величинами доз составляло от десятых долей до единиц процентов.

Полученные результаты позволяют сделать вывод об адекватности предлагаемой методики и возможности ее использования для оценок радиационной стойкости аппаратуры дистанционного зондирования Земли в условиях эксплуатации.

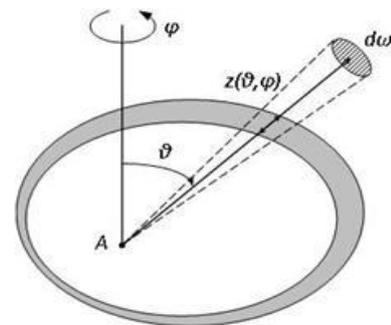


Рисунок 1. Точка A внутри защитного экрана с элементом телесного угла $d\omega$ в сферической системе координат (θ, φ) .

Секция 4, 5

Опыт использования призмленного видеоспектрометра «Лептон» для измерения отражательных свойств элементов наземной тестовой мишенной обстановки

Чапурский Л.И., Алексеев А.А., Астахова Е.И., Григорьева О.В.,
Жадковский А.В., Жуков Д.В., Терентьева В.В.
Военно-космическая академии имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург
Кудрявцев С.В.
ЗАО НПО «Лептон», г Москва, Зеленоград

Летом 2012 г. на самолёте Ан-30 «Фотон» с использованием видеоспектрометра (ВС) «Фрегат» выполнялись измерения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) объектов и фонов в двадцати районах Северо-Западного территориального округа (СЗТО) РФ. Целью исследований являлось получение новой информации для базы данных КСЯ, использующей ГИС-технологии [1].

В ВС «Фрегат» используется монохроматор с дифракционной решеткой, а в качестве датчика сигналов изображений - видеокамера SDU-285 [2], имеющая стандартные функции регулировки экспозиции и биннинга (объединения сигналов изображений, снимаемых с ПЗС-матрицы). Специальная программа управления режимами биннинга обеспечивает выполнение видеоспектральных съёмок в 256, 128 или 64 спектральных каналах на интервале длин волн от 480 до 950 нм. Прибор работает при значениях освещённости сюжета от 3000 до более 100000 люкс.

Калибровка шкалы интенсивности сигналов ВС в значениях спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) выполнялась в НПО «Лептон» весной 2011 г. При выполнении нового этапа ЛЭР необходимо было проверить достоверность этой калибровки.

При измерениях КСЯ элементов ландшафта с летательных аппаратов необходимо, чтобы в пределах объекта съёмки располагались элементы наземной тестовой мишенной обстановки (НТМО). Наиболее полный состав элементов НТМО - специальные чёрно-белые и цветные полосовые или/и радиальные миры, большие квадраты с известными коэффициентами отражения, «колодцы» и др. – применяют на тестовых полигонах, предназначенных для калибровки и валидации аппаратуры космического и авиационного базирования. В качестве примера можно указать на работу [3], в которой описан состав НТМО, созданной на Китайском валидационном полигоне.

В работе [4] показано, что при отсутствии специальной НТМО в качестве тестовых можно использовать существующие элементы ландшафта - бетонные и асфальтовые покрытия, крыши зданий, газоны, сельскохозяйственные поля, водоёмы. Аналогичная методика организации НТМО использовалась при выполнении данного этапа ЛЭР.

Для определения КСЯ и СПЭЯ элементов НТМО, а также с целью проверки калибровки шкалы интенсивности сигналов ВС «Фрегат», использовался опытный образец авиационного видеоспектрометра, предоставленный ВКА имени А.Ф. Можайского компанией ЗАО «НПО «Лептон» в порядке оказания научно-технической помощи.

В ВС «Лептон» в качестве диспергирующего элемента используется призма прямого видения; преобразование оптических сигналов в электрические осуществляется с помощью ПЗС-матрицы SONY-ICX255, имеющей 500x290 активных пикселей размером 2,6x9,8 нм. ВС обеспечивает съёмку в 290 спектральных каналах шириной от 0,35 до 12,7 нм в диапазоне длин волн 400-989 нм. Конструктивно блок ВС совмещён с фотограмметрической камерой, ось визирования которой параллельна таковой ВС. Кадры спектров строк изображений ВС и кадры изображений исследуемого сюжета ФГМК по двум кабелям длиной до 5 м передаются на USB порты ноутбука. На компьютере также регистрируются сигналы от приёмника GPS-ГЛОНАСС. Шкала интенсивности сигналов прибора прокалибрована в значениях СПЭЯ.

За период выполнения этапа ЛЭР с 20.06 по 12.07 наземной группой с помощью ВС «Лептон» выполнена аттестация элементов НТМО в пяти районах выполнения аэросъёмки. Совмещённые с аэросъёмкой измерения НТМО удалось произвести только на аэродроме базирования 3 июля. При наземных измерениях КСЯ поверхностей регистрировались суммарная освещённость сюжета, состояние неба и производилась фотосъёмка исследуемых объектов.

Синхронная ВС съёмка объектов и фонов с помощью ВС «Фрегат» и «Лептон» выполнена 3, 4 и 5 июля в шести районах СЗТО РФ.

В результате выполнения этапа ЛЭР получены высококачественные материалы как наземных измерений, так и авиационных ВС съёмок. Всесторонние наземные и лётные испытания ВС «Лептон» показали его высокие эксплуатационные характеристики. Выявлена необходимость доработки ПО предварительной обработки ВС данных и методик калибровки аппаратуры.

Литература

1. Григорьева О.В., Марков А.В., Саидов А.Г., Чапурский Л.И. База данных для фоноцелевого информационного обеспечения систем дистанционных исследований, использующая ГИС-технологии. Труды 2-го «Всеросс. научн. конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля природной среды» Т1, ВКА им. А.Ф. Можайского, СПб, 2012, С.64-68

2. <http://www.sptt.ru> /Цифровые камеры SDU

3. Yong-sheng Zhou. UAV-based Remote Sensing Sensor Pre-launch Calibration and Validation System. WGCV-33, 17-20 May, 2011 Moscow, Russia

4. Чапурский Л.И., Марков А.В., Мочалов В.Ф., Ясинский Г.И.. Проблемы информационного обеспечения оптических космических систем экологического назначения. // Оптический журнал. 2000, Т.67, №7, С.111-117.

Вычислительная система обработки данных гиперспектрального аэрокосмического зондирования

Козодеров В.В.

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, г. Москва
vkozod@mail.ru

Кондранин Т.В.

Московский физико-технический институт (государственный университет),
Московской область, г. Долгопрудный

Дмитриев Е.В.

Институт вычислительной математики Российской академии наук, г. Москва
Каменцев В.П.

Тверской государственный университет, г. Тверь

Существующие средства обработки данных дистанционного аэрокосмического зондирования, поставляемые в основном зарубежными фирмами, задействуют достаточно стандартные операции: цветокодирование изображений; классификация объектов; построение гистограмм распределения разных классов объектов по относительным грациям исходных яркостей; подсчет площадей, занятых разными классами и т.п. Создаваемый оригинальный вычислительный комплекс обработки данных гиперспектрального зондирования на базе языка Matlab для операционных систем Windows XP/Vista/7 и Linux реализует следующие этапы:

- Преобразование исходных данных в соответствии с выбранным форматом их отображения при съёмке, наземной калибровкой аппаратуры и определением зависимости отношения «сигнал/шум» аппаратуры с учетом времени накопления используемых ПЗС-матриц.
 - Коррекция и трансформация данных, их географическая привязка.
 - RGB-синтезирование и визуализация полученных спектров.
 - Оконтуривание объектов интереса и обучение используемого классификатора (вычислительной процедуры) по тестовой выборке.
 - Пространственный и спектральный анализ данных.
 - Распознавание природно-техногенных объектов.
 - Восстановление характеристик биологической продуктивности лесной растительности для соответствующих сегментов обрабатываемых изображений.

Положенные в основу создаваемой системы методы, алгоритмы и программное обеспечение используют спектральные и текстурные признаки объектов аэрокосмического мониторинга. Проводится оптимизация каналов гиперспектрального зондирования для устранения их возможной избыточности при нахождении межканальных корреляций с целью повышения эффективности вычислительных процессов. Общей оптимизационной задачей является минимизация функционала среднего риска неправильной классификации объектов на обрабатываемых гиперспектральных изображениях.

Вычислительная технология обработки данных гиперспектрального зондирования для решения региональных прикладных задач отработывалась на примере лётных испытаний отечественной гиперспектральной камеры (ГСК) разработки НПО «Лептон», г. Зеленоград, базового предприятия МФТИ. Аппаратура устанавливалась на самолётную гиро-стабилизированную платформу вместе с аппаратурой аэрофотосъёмки, системы глобального спутникового позиционирования и других измерительных комплексов при облётах выбранной тестовой территории Тверской области. Спектральное разрешение ГСК около 1 нм в коротковолновых каналах и 5-10 нм в длинноволновых каналах для длин волн от 400 нм до 1000 нм. Для тестовой территории самолётных маршрутов проводились лесотаксационные, геоботанические, лесотипологические описания для анализа регистрируемых спектральных плотностей энергетической яркости (СПЭЯ), привязанных к соответствующим классам лесной растительности разного породного состава и возраста.

При пространственном разрешении ГСК около 1 м для высот аэросъёмки около 2 км изображения лесного полога имеют характерную текстуру, которую составляют перемежающиеся освещённые и затенённые участки крон, а также межкрупные просветы. Регистрируемые СПЭЯ освещённых участков определяются в основном оптическими свойствами кроны, текущими атмосферными условиями и высотой Солнца в момент съёмки. При этом ГСК обеспечивает высокие значения отношений «сигнал/шум». Отражение солнечного излучения затенёнными участками крон происходит более сложным образом. Здесь становится существенным многократное рассеяние света внутри кроны и спектральные свойства подстилающей поверхности. Уровень сигнала ГСК здесь значительно ниже, чем для освещённых фитоэлементов лесной растительности. Возрастает влияние собственной шумовой составляющей аппаратуры на формирование СПЭЯ.

По данным гиперспектральной аэросъёмки проведён анализ и систематизация отдельных информационных слоев (пиксели, охватывающие освещённые, затенённые и переходные участки крон) регистрируемых СПЭЯ для сравнительно однородных лесных выделов разного породного состава и возраста на тестовой территории. Открываются перспективы автоматизации разработанных процедур обработки гиперспектральных изображений. В случае дополнительной установки на гиро-стабилизированную платформу системы лидарного сканирования, обеспечивающей получение трехмерной распределения фитоэлементов лесного полога, может быть создан уникальный аппаратно-программный комплекс оценки качества древесины (зависит от возраста и высоты соответствующих экосистем) и параметризации средообразующей роли лесов в моделях климата.

Исследования проводятся при финансовой поддержке грантов РФФИ 11-07-00382, 11-07-12006_офи_м и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, г/к № ПЗ49 и № 14.740.11.1091.

Методическое и программное обеспечение тематической обработки аэрокосмических гиперспектральных изображений. Проблемы и перспективы

Чабан Л.Н., Николенко А.А., Страхов П.В., Шурыгин Б.М.
Московский физико-технический институт (государственный университет),
г. Москва
alex_nikolenko@mail.ru

На протяжении последних лет кафедра СУМГФ МФТИ выполняла численные эксперименты по тематической обработке гиперспектральных изображений в диапазоне длин волн 400-1000 нм. Исходные материалы включали изображения, полученные полевым видеоспектрометром, материалы гиперспектральной аэросъемки на тестовых полигонах в Тверской области и Краснодарском крае. Изображения были получены с гиперспектральной аппаратуры, разработанной ЗАО НПО «Лептон». Для оценки перспектив использования отечественной гиперспектральной аппаратуры космического базирования проводилось моделирование гиперспектральных изображений различного пространственного разрешения с учетом влияния атмосферы на величину сигнала, регистрируемого на борту КА [1]. Кроме того, выполнялась обработка доступных гиперспектральных изображений, полученных аппаратурой Hyperion со спутника EO-1, а также изображений с экспериментальной аппаратуры ЗАО НПО «Лептон», установленной на спутнике МКА ФКИ.

Опыт тематической обработки аэрокосмических гиперспектральных изображений, отраженный в зарубежной литературе [2,3], позволяет выделить три основных типа задач тематической обработки гиперспектральных изображений.

1. Тематическое картографирование на основе автоматической классификации пикселей изображения (контролируемой и неконтролируемой).
2. Выделение определенных типов объектов земной поверхности с использованием эталонных спектров отражения.
3. Выделение определенных типов объектов и их состояний с использованием узкополосных индексов (комбинаций каналов).

В каждом из указанных направлений используется свой методический аппарат, предъявляющий определенные требования к предварительной обработке исходных данных. В процессе наших исследований были проанализированы все три типа задач, что послужило основой для создания специализированного программного обеспечения тематической обработки гиперспектральных изображений.

Основное преимущество гиперспектральных видеоданных перед мультиспектральными при решении задач тематического картографирования - возможность выбора наиболее репрезентативного набора спектральных зон для каждого типа сцены и сезона съемки. Использование всех каналов

гиперспектрометра, из-за высокой корреляции части каналов, в этом случае ни имеет смысла. Узловым моментом при решении такого типа задач является автоматизация отбора наиболее информативных каналов. В разработанном на кафедре СУМГФ МФТИ пакете реализован автоматический отбор каналов на основе анализа главных компонент [4], а также управляемый отбор с участием пользователя.

Прямое решение очевидной, на первый взгляд, задачи выделения объектов определенного типа по характеру зависимости спектральной яркости объекта от длины волны оказывается в реализации наиболее сложным. Сопоставление спектральных кривых с библиотечным эталоном требует приведения всех данных к единой яркостной шкале, то есть полноценной радиационной коррекции. Имеющиеся в пакетах ERDAS и ENVI модули атмосферной коррекции (эмпирической и с использованием пакета MODTRAN) далеко не всегда обеспечивают приемлемое качество результата. В настоящее время с использованием собственного модуля атмосферной коррекции и моделей переноса излучения пакета MODTRAN нам удалось добиться качественной коррекции только для самолетных гиперспектральных изображений. Работы по выполнению атмосферной коррекции космических изображений продолжаются.

В связи с указанной проблемой использование индексов для выделения определенного типа объектов и их состояний в ряде случаев оказывается более эффективным, чем выделение объектов по спектру отражения. Использование вегетационных индексов для определения различных показателей состояния растительности – перспективное и быстро развивающееся направление. К настоящему времени разработано большое количество вегетационных индексов, в том числе и с использованием узкополосных каналов [2]. Однако значительная часть таких индексов создается под конкретные типы штатной аппаратуры ДЗ, то есть с учетом положения и ширины спектральных каналов. Решение таких задач на новых типах гиперспектральных изображений требует качественной калибровки аппаратуры и адаптации индексов к соответствующим калибровочным характеристикам.

С учетом этих фактов в пакете тематической обработки гиперспектральных изображений наибольшее внимание было уделено блоку спектрального анализа. Кроме возможностей построения различных индексов, блок включает возможности моделирования смесей и сравнения по нескольким критериям спектров, полученных из самых разнообразных источников. Разработан и реализован аппарат работы с библиотечными спектрами, в том числе поиск спектров по тематическим, сезонным и географическим критериям.

Кроме перечисленных функций, пакет включает полный набор функций, необходимых для решения тематических задач на основе существующих методик и известных алгоритмов классификации. Реализованы функции географической привязки, геометрической коррекции и составления мозаик изображений, доведения результатов классификации до тематической карты. Однако основным направлением развития данного программно-методического

обеспечения является расширение возможностей спектрального анализа видеоданных, при этом в программно-инструментальной среде, максимально адаптированной к восприятию и использованию широким кругом отечественных потребителей.

Литература

1. Л.Н.Чабан, Г.В.Вечерук, Т.В.Кондранин, С.В.Кудрявцев, А.А.Николенко Моделирование и тематическая обработка изображений, идентичных видеоданным с готовящейся к запуску и разрабатываемой гиперспектральной аппаратуры ДЗЗ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т.9. №2. С. 111-121.
2. Hiperspectral remote sensing of vegetation. Edited by Prasard S. Thenkabail, John G. Lyon, Alfredo Huete. – CRC Press Taylor & Francis Group, 2012.
3. IMAGINE Spectral Analysis. User's Guide. Leica Geosystems GIS&Mapping, LLC, Atlanta, USA, 2003.
4. Чабан Л.Н., Вечерук Г.В., Гаврилова Т.С. Исследование возможностей классификации растительного покрова по гиперспектральным изображениям в пакетах тематической обработки данных дистанционного зондирования // Труды МФТИ, Т.1, №3, 2009, с.171-180.

Влияние предварительной обработки данных гиперспектральной съемки на качество их тематического анализа

Остриков В.Н., Плахотников О.В.

ОАО «Концерн радиостроения «Вега», Филиал в г. Санкт-Петербург
mail@spb.vega.su

Большинство существующих образцов аппаратуры гиперспектральной съемки (ГСС) строится по схеме строчного сканирования местности типа «push-broom». В итоге на результатах съемки неизбежно присутствует регулярный полосовой (горизонтальный и вертикальный) шум. Кроме того, для такой схемы сканирования характерно наличие существенной неравномерности засветки фотоприемной матрицы от центра кадра к краю. Поскольку используемые в ходе съемки спектральные линии достаточно узкие (единицы нанометров), для полученных данных характерен сравнительно высокий уровень случайного шума.

Вместе с тем, успешность тематической обработки данных ГСС в значительной степени зависит от их качества. В тех случаях, когда перед обработкой ставится задача обнаружения и идентификации малозаметных (с низким спектральным контрастом) или соизмеримых с размером пространственного разрешения объектов, предварительное радиометрическое улучшение результатов съемки является необходимым этапом общего комплекса обработки.

Важным специфическим свойством, которому должны удовлетворять применяемые методы и алгоритмы предварительной подготовки, является отсутствие вносимых спектральных искажений в элементы формируемых спектральных «кубов». В связи с этим большинство известных методов, широко используемых для радиометрической корректировки результатов панхроматической съемки, нельзя использовать в явном виде. В особой степени это касается коррекции регулярных и случайных шумов.

Для компенсации подобного рода искажений разработаны специальные алгоритмы коррекции, не оказывающие влияние на собственно спектральные характеристики наблюдаемых элементов сцен. Так, для демпфирования регулярного шума предложен и успешно реализован алгоритм раздельного высокочастотного подавления полосовых искажений, не вносящий артефакты в спектральные векторы.

Из литературы известно, что для снижения случайных шумов спектральных «кубов» без потерь широко используется метод сжатия на основе главных компонент, который характеризуется весьма значительными временными затратами на реализацию вычислений. Для тех случаев, когда этот фактор является важным, разработан быстрый алгоритм фильтрации случайного шума, также не вносящий потерь в результаты обработки.

В итоге разработанные методы радиометрической коррекции данных ГСС позволяют в целом с высоким качеством реализовать последующую тематическую обработку.

В докладе приводятся примеры проведения обнаружения и идентификации объектов сцен, характеризуемых низким спектральным контрастом. Наглядно демонстрируются результаты применения алгоритмов к результатам спектральной съемки до и после применения специальных методов радиометрической коррекции. Демонстрируется также визуальная возможность повышения качества снимков на отдельных спектральных линиях только за счет снижения радиометрических шумов.

В ходе доклада используются данные, полученные при проведении наземных и авиационных экспериментальных работ в 2011-2012 г.г. в районе Северо-запада РФ. Во всех случаях применение означенных подходов приводит к существенному повышению качества конечной обработки спектральных данных.

Калибровка гиперспектральных данных авиационной съемки по сопутствующим наземным измерениям эталонных поверхностей наблюдаемых сцен

Остриков В.Н., Плахотников О.В.

ОАО «Концерн радиостроения «Вега», Филиал в г. Санкт-Петербург

mail@spb.vega.su

Успешность тематической обработки данных гиперспектральной съемки (ГСС) в значительной степени зависит от качества реализации внешней калибровки, результатом которой является пересчет получаемых «кубов» в распределения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ). Для этого преобразования, в большинстве случаев, используются методы атмосферной коррекции с определением обратной передаточной функции трассы «разрешаемый элемент поверхности - регистрирующий прибор». Такие методы пересчета требуют, в свою очередь, периодического контроля реализуемой точности на основе специальных эталонов с проведением сопутствующих (синхронно или квазисинхронно с дистанционной съемкой) наземных измерений. Кроме того, для получения широкого набора характеристик различных поверхностей и объектов наблюдения, создания баз спектральных характеристик для решения задачи идентификации, такие совместные измерения используются для непосредственного пересчета получаемых данных в КСЯ.

В предлагаемых материалах рассматриваются результаты осуществления внешней калибровки авиационных данных ГСС по нескольким натурным экспедициям в районе Северо-запада РФ в 2011-2012 г.г. с применением различных образцов видеоспектрометров. В ходе проведения экспериментов осуществлялась съемка как урбанизированных, так и сельских участков местности. В качестве наземных эталонных поверхностей, измеряемых ручным спектрорадиометром в диапазоне 0.35-1.0 мкм, использовались наборы естественных поверхностей регистрируемых сцен - асфальтовое покрытие шоссе и участки растительности, а также специальные искусственные эталоны в виде матерчатых и дакроновых полотнищ, с различными КСЯ, размещаемые на однородных фонах. При этом собственно пересчет проводился на основе одних поверхностей, а его качество контролировалось сравнением с другими образцами.

Результаты совместной обработки авиационных и наземных данных показали, что используемая методика проведения сопутствующих наземных измерений и применяемые при этом алгоритмы позволяют качественно пересчитывать получаемые дистанционной аппаратурой данные ГСС в КСЯ сцен. Количественное сравнение полученных оценок КСЯ показали, что реализованные при этом точности калибровки в основном соответствуют аналогичным результатам, опубликованным в зарубежной аппаратуре.

Использование совместных наземных измерений спектральных плотностей энергетической яркости и КСЯ эталонных поверхностей с помощью ручного спектрорадиометра позволяет также верифицировать выбор параметров модели MODTRAN 5.2, описывающей влияние атмосферной трассы на момент проведения съемки.

Классификация объектов земной поверхности по данным гиперспектральной съемки на основе методов искусственного интеллекта

Тишкин Р.В.

Филиал ФГУБ «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» – ОКБ «Спектр», г. Рязань

Юдаков А.А.

ФГУБ «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

roman.tishkin@mail.ru

В настоящее время большой интерес представляет использование гиперспектральных изображений земной поверхности, полученных при дистанционном зондировании, в особенности классификация различных объектов земной поверхности по данным гиперспектральной съемки.

При гиперспектральной съемке поверхности Земли большинство объектов, попавших в поле обзора датчика, неоднородны. В случае гиперспектральной съемки рассчитываемый спектральный состав пикселя является комбинацией спектральных характеристик объектов, которые этот пиксель образуют. В связи с этим возникает ряд новых задач.

Во-первых, требуется «очистка» спектральной характеристики объекта для его более надежной классификации с использованием библиотек спектральных эталонов.

Во-вторых, привлекательной является возможность восстановления информации о компонентном составе пикселей изображения, т.е. субпиксельной классификации.

Под субпиксельной классификацией понимается процедура, в ходе которой измеренный спектр пикселя разбивается на набор составляющих спектров (конечных элементов, объектов) с определением соответствующих долей (показателей относительного содержания), которые показывают пропорции каждого конкретного объекта, входящего в состав пикселя. Конечные элементы могут соответствовать известным макроскопическим элементам среды, таким как вода, почва, металл, растительность либо другим объектам.

Для решения указанных выше задач (как для классификации объектов размером в несколько пикселей, так и для субпиксельной классификации) целесообразным представляется использование методов искусственного интеллекта: нечеткой логики, эволюционных вычислений и др. Указанные подходы позволяют гибко адаптироваться к решаемой задаче, особенно в условиях неопределенности.

В докладе рассмотрены известные и предлагаемые подходы к решению задачи классификации объектов на гиперспектральных изображениях земной поверхности.

Информационные технологии комплексирования материалов гиперспектральной съемки Земли с данными от других съемочных систем

Макаренков А.А., Москвитин А.Э.
ФГБОУ ВПО «РГРТУ», г. Рязань
foton@rsreu.ru

Внедрение гиперспектральных съемочных систем является одной из актуальных задач развития технологий дистанционного зондирования Земли. Гиперспектральная аппаратура (ГСА) производит съемку в сотнях узких (от ~ 1 до ~ 10 нм) спектральных диапазонов видимого и инфракрасного излучения. Наличие информации о подстилающей поверхности в сотнях спектральных каналов позволяет с высокой точностью анализировать распределение энергии отраженного от поверхности излучения в зависимости от длины волны, т.е. построить спектральную характеристику (СХ) объектов съемки. СХ характеризует физико-химические параметры объектов, что позволяет получить детальное описание подстилающей поверхности.

Гиперспектральная аппаратура обладает высоким спектральным разрешением по сравнению с другими съемочными системами. Однако пространственное разрешение ГСА обычно существенно ниже аналогичных панхроматических и мультиспектральных датчиков. Это создает предпосылки к разработке алгоритмов, позволяющих совместить данные от гиперспектральной аппаратуры с панхроматическими или мультиспектральными снимками с целью получения видеоданных с высоким как пространственным, так и спектральным разрешением. При этом также имеется возможность повысить информативность панхроматических и мультиспектральных снимков за счет объединения с гиперспектральной информацией.

В докладе рассмотрены вопросы комплексирования видеоданных от съемочной аппаратуры, устанавливаемой на КА «Ресурс-П», с целью формирования гиперспектральных изображений с высоким пространственным и спектральным разрешением, а также улучшение свойств панхроматических и мультиспектральных данных за счет привлечения гиперспектральной информации. Работа алгоритмов комплексирования продемонстрирована на натуральных гиперспектральных снимках со спутниковой системы Hyperion (США) и авиационных датчиков AVIRIS, ProSpecTIR-V (США), НуМар (Австралия).

Бортовой видеоспектрометр «Сокол-ГЦП»: результаты летных испытаний и опытной аэросъемки

Седельников В.П., Лукашевич Е.Л., Карпухина О.А.

ФГУП «Государственный научно-исследовательский и производственный центр «Природа», г. Москва
priroda@dol.ru

В 2006-2007 годах ФГУП «Госцентр «Природа» был реализован проект создания экспериментального образца бортового (самолетного) гиперспектрального видеоспектрометра (БВС) «Сокол-ГЦП», впервые ориентированного на решение задачи идентификации отдельных видов травянистой растительности. Целевым объектом идентификации являлась наркотикосодержащая растительность – конопля и мак.

В связи с этим, в основу формирования тактико-технических характеристик БВС «Сокол-ГЦП» легли данные, полученные в результате трехлетних полевых спектрометрических исследований наркотикосодержащей и маскирующей растительности, выполненных на тестовых участках.

ТТТ на БВС «Сокол-ГЦП» были разработаны с учетом полного технологического цикла получения, обработки и представления оперативной спектральной информации, включая процесс калибровки аппаратуры, нормализации спектральных данных, географической и временной привязки изображения, получения потока данных, совместимых с существующими программными комплексами обработки гиперспектральных изображений.

Создание экспериментального образца БВС «Сокол-ГЦП» в соответствии с ТТТ выполнялось ОАО «КМЗ» и было завершено в декабре 2007 года.

Созданный экспериментальный образец БВС «Сокол-ГЦП» включает в себя:

- камеру оптико-электронную КОЭ-1.0;
- комплект жгутов и перемычек;
- блок питания БП-1.0;
- ПППЭВМ (ноутбук) TS STRONG@ MASTER 7020T;
- модуль приёмоизмерительный ГЛОНАСС/GPS с антенной.

Следует отметить, что экспериментальный образец БВС «Сокол-ГЦП» обладает оптимальным соотношением стоимости разработки (ограниченной финансированием работ) и тактико-технических характеристик.

Заложенное схемотехническое решение БВС реализует:

- получение «одномерного» изображения местности в режиме электронного сканирования;
- разложение в спектр «одномерного» изображения местности по координате направления полета носителя;
- проектирование спектра изображения местности на матричный ПЗС-приемник и его регистрацию с частотой кадров, пропорциональной скорости полета и уровню пространственного разрешения.

В июне-августе 2008 г. были успешно проведены летные испытания, а в 2009 г. - опытная аэросъемка БВС «Сокол-ГЦП» на тестовых участках с посевами РСНВ и специально созданными эталонными участками (растительными мирами) в Лунинском районе Пензенской области и Краснодарском крае. Аэросъемки выполнялись с самолета Ан-2.

В процессе летных испытаний:

- проверено функционирование БВС и подтверждена его работоспособность в условиях эксплуатации,
- проведена оценка влияния условий съемки (высота, скорость полета, погрешности ориентации и стабилизации КОЭ) на пространственное и спектральное разрешение аппаратуры,
- разработаны рекомендации по выбору оптимальных режимов съемки,
- выполнена отработка эксплуатационной документации,
- выполнена отработка бортового программного обеспечения,
- выполнены съемки запланированных территорий,
- выполнены съемки тестового полигона,
- проведено обучение специалистов ФГУП «Госцентр «Природа» работе с БВС «Сокол - ГЦП».

В результате испытаний было подтверждено соответствие технических характеристик экспериментального образца заданным, и стабильность параметров, в т. ч.:

- разрешение на местности (размер проекции пикселя на местности при съемке в надир с высоты $H=1,0$ км) – 1 м;
- полоса захвата (при съемке в надир с высоты $H=1,0$ км) – 0.5 км;
- стабильность результатов спектрометрической калибровки – смещение шкалы длин волн составило менее $1/5$ элемента ФПЗС-приемника ($S_{Ctr}=0.025$), что не требует пересчета данных спектрометрической калибровки из формуляра (БВС-1.0 ФО) при тематической обработке видеоинформации;
- обеспечение съемки во всем диапазоне входных яркостей при использовании комплекта специальных нейтральных светофильтров.

В процессе летных испытаний и опытной аэросъемки получены данные в 105 спектральных каналах в диапазоне длин волн 530-950 нм со спектральным разрешением лучше 5 нм в диапазоне 530-800 нм и лучше 8 нм – в диапазоне 800-950 нм с разрешением на местности не хуже 1м с высоты 1 000м.

Синхронно со съемкой БВС «Сокол-ГЦП» проводилась съемка цифровой аэросъемочной камерой высокого пространственного разрешения (20-40см), информация с которой использовалась для выполнения геометрических преобразований гиперспектральных изображений и верификации результатов их автоматизированной обработки.

Полученный опыт эксплуатации БВС «Сокол-ГЦП» позволил выявить некоторые технические и эксплуатационные параметры аппаратуры, которые нуждаются в последующей доработке.

Опыт использования данных гиперспектральной аэросъемки для обнаружения наркотикосодержащей растительности

Карпухина О.А.

ФГУП «Государственный научно-исследовательский и производственный центр «Природа», г. Москва
priroda@dol.ru

В 2008-2009 годах в результате летных испытаний и опытной аэросъемки бортовым гиперспектральным видеоспектрометром (БВС) «Сокол-ГЦП» были получены данные в 105 спектральных каналах в диапазоне длин волн 530-950 нм на тестовые участки с посевами наркотикосодержащих растений (конопли и мака) и растительными мирами в Пензенской области и Краснодарском крае. Спектральное разрешение полученной цифровой информации лучше 5 нм в диапазоне 530-800 нм и лучше 8 нм – в диапазоне 800-950 нм, пространственное разрешение (проекция пикселя на местности) - 1м с высоты 1 000 м.

Основной задачей обработки гиперспектральных данных являлась классификация растительных покровов по их спектральным признакам с целью выделения наркотикосодержащих растений на фоне остальных типов растительности, характерных для территорий аэросъемок. Наибольший интерес представляло выделение растений, содержащих наркотические вещества (РСНВ), на фоне травянистой растительности, так как древесно-кустарниковая растительность опознается по прямым дешифровочным признакам.

Результаты пятилетних исследований коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) травянистой растительности показали, что покровы конопли и мака не имеют каких-либо оригинальных полос поглощения в рассматриваемой области спектра. Их коэффициенты спектральной яркости отличаются от КСЯ прочей травянистой растительности (условно называемой «маскирующая») лишь амплитудами колебаний в зеленой и ближней ИК областях спектра.

Следует отметить, что методы классификации гиперспектральных данных в применении к травянистой растительности развиты очень слабо. Это обусловлено как отсутствием каких-либо специфических полос поглощения в спектрах отражения различных видов здоровой травянистой растительности, так и сложностью обработки больших объемов данных, получаемых гиперспектрометрами.

Одним из самых разработанных программных продуктов в этой области является программный комплекс ENVI, в котором (с использованием алгоритмов классификации с обучением) осуществлялась обработка данных, полученных БВС «Сокол-ГЦП».

Методически работа по обработке гиперспектральных данных с использованием классификации с обучением включала в себя три основных этапа.

На первом этапе на гиперспектральном изображении выделялись эталоны, которые использовались в процессе классификации в качестве обучающих образов. Количество выделенных «образов» определяет число классов при классификации. При этом следует иметь в виду, что чем больше обучающие выборки внутри каждого класса (т.е., чем больше представлено имеющихся на территории разнообразий данного класса), тем точнее результаты классификации.

На втором этапе (в целях установления при классификации порога сходимости спектров с обучающими «образами») проводился анализ спектральных плотностей энергетической яркости выделенных классов объектов (средних значений и стандартных отклонений). Для наркотикосодержащих растений анализировались также спектральные профили.

Третий этап включал в себя собственно классификацию гиперспектральных данных, в процессе которой отнесение пикселя гиперспектрального изображения к некоторому классу осуществляется программно на основании минимума (максимума) дискриминантной функции соответствующего метода, имеющегося в программном комплексе.

Чтобы избежать искажений спектральных плотностей энергетических яркостей, происходящих в результате их перерасчетов при выполнении различных преобразований исходных изображений, обрабатывались только оригинальные (не перепроецированные) данные.

Для обработки и анализа были отобраны изображения, полученные на разных стадиях вегетации наркотикосодержащих растений: от начала бутонизации до созревания. Опыт интерактивной обработки с автоматизированной классификацией подтвердил возможность использования гиперспектральной информации для обнаружения участков произрастания конопли и мака, в том числе - в смешанных посевах с маскирующей растительностью. При этом участки, занятые коноплей, выявлялись на расстоянии до 5 километров от эталонных участков.

Анализ статистики по выделению конопли и мака свидетельствует о том, что по гиперспектральным данным наилучшие результаты получены при использовании метода расстояния Махаланобиса для выделения посевов конопли, находящейся в фазе массового цветения, и мака, находящегося в стадии массовой бутонизации.

Ошибка ложного опознавания травянистых растений как конопли составила 40% в период ее массового цветения, как мака - 38% в период его массовой бутонизации (от общего количества пикселей идентифицированных как конопля и мак).

Необходимо отметить, что полученные результаты привязаны к определенным сортам и видам РСНВ и маскирующей растительности, конкретным фазам вегетации и гидрометеорологическим условиям, их обусловившим.

О влиянии атмосферы на входной сигнал спутниковой аппаратуры ДЗЗ над высокогорным валидационным полигоном в видимом и БИК спектральных диапазонах

Постыляков О.В., Боровский А.Н., Локштанов С.Е., Еланский Н.Ф.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва

oleg-postylyakov@yandex.ru

Беликов Ю.Е.

Институт прикладной геофизики им. Е. К. Федорова, г. Москва

Митин И.В.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г.Москва

Один из подходов к решению задач валидации и замещающей энергетической калибровки гиперспектральной спутниковой аппаратуры ДЗЗ основан на выполнении съемки тестовых участков, имеющих известное отражение. Затем результаты съемки сравниваются с характеристиками заатмосферного излучения, смоделированными путем расчета искажений, вносимых в ходе распространения солнечного излучения в атмосфере.

Атмосферные искажения существенно зависят от оптической толщи атмосферы, меняющейся с высотой. Условия наблюдений на высокогорной станции существенно отличаются от равнинных. Кисловодская высокогорная научная станция (КВНС) ИФА им. А.М. Обухова РАН, располагающаяся на высоте 2050 м, большую часть года находится выше пограничного слоя атмосферы (ПСА). ПСА содержит существенную часть загрязняющих примесей атмосферы. Так типичные значения оптической толщи аэрозоля на 550 нм в высокогорье составляют менее 0.03-0.1 (против 0.2-1.5 на уровне моря). Давление, а следовательно оптическая толщина релеевского рассеяния, составляет 80% от давления на уровне моря. Оптическая толщина водяного пара составляет примерно 30% от толщи на уровне моря. Поскольку для точного решения уравнения переноса излучения в атмосфере, требующегося в задачах калибровки и валидации, требуется знание вертикальных распределений газов и аэрозоля в атмосфере, а наиболее простая аппаратура для наземных измерений дает только их общее содержание, существенно то, что вертикальное распределение характеристик атмосферы выше ПСА значительно более однородно. Поэтому ошибка расчета СПЭЯ, связанная с моделированием вертикальных распределений существенно меньше.

Кроме этого, высотное расположение КВНС приводит к тому, что станция большую часть года находится выше слоя облачности, который мог бы мешать проведению космической съемки.

На рисунках 1 и 2 приведены примеры расчета СПЭЯ и атмосферной дымки для различных высот валидационного полигона для спектрального разрешения ГСА «Ресурс П». Условия наблюдения: зенитный угол солнца - 45 градусов, съемка в надир.

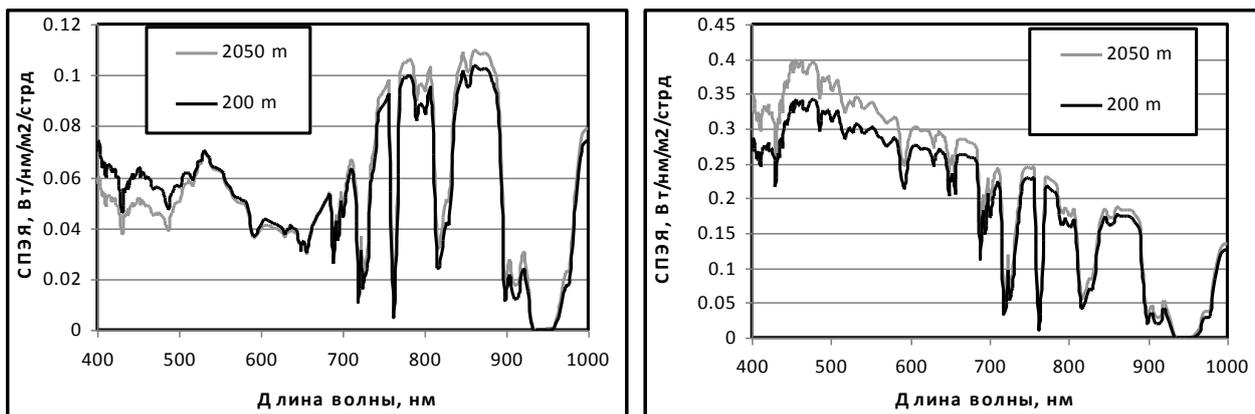


Рис. 1. СПЭЯ тестовых участков, расположенных на высотах 200 м и 2050 м, для двух типов поверхности: трава и искусственное покрытие с альбедо 85%.

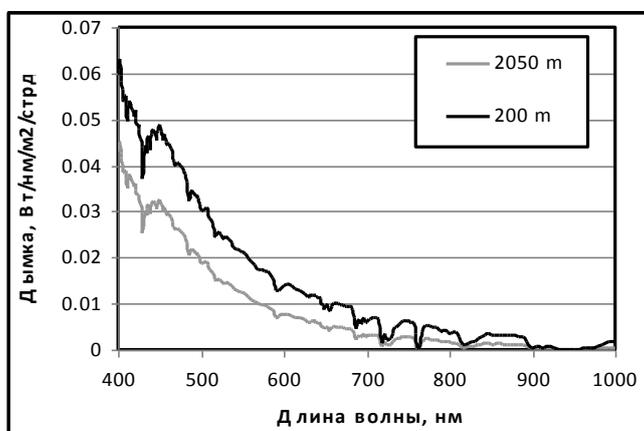


Рис. 2. Дымка для тестовых участков, расположенных на высотах 200 м и 2050 м. От типа поверхности не зависит.

В докладе сравниваются атмосферные искажения для тестовых участков, расположенных на Кисловодской высокогорной научной станции ИФА РАН, расположенной на высоте 2050 м, и на равнинном полигоне (200 м), анализируются точности расчетов заатмосферной СПЭЯ.

Инновационный подход к комплексной тематической обработке материалов ДЗЗ

Горюнова В.Н.

ООО «Центр инновационных технологий», г. Москва

gorynova_v@novacenter.ru

В настоящее время создание и развитие космических средств и технологий дистанционного зондирования Земли является одним из важнейших направлений применения космической техники для социально-экономических, научных и оборонных целей. Существующие на настоящий момент космические системы ДЗЗ обеспечивают сбор данных в глобальном масштабе с высоким пространственным и спектральным разрешением.

Одной из тенденций развития современных космических систем дистанционного зондирования является переход к активному использованию гиперспектральных данных. Информативность снимков повышается за счет использования новой системы признаков на основе спектральных характеристик зарегистрированного оптического излучения.

Гиперспектральные данные обладают огромным потенциалом для развития технологий наблюдения и автоматизированного распознавания объектов. Анализируя современное состояние, можно ожидать широкой практической реализации и активного внедрения гиперспектральной съемки в практику дистанционного зондирования Земли из космоса. Технологии обработки гиперспектральных снимков находят применение в лесном и сельском хозяйстве, при мониторинге трубопроводов, поиске полезных ископаемых и т.д.

В настоящее время существует целый ряд российских и зарубежных программных продуктов для обработки материалов данных ДЗЗ. Большинство разработчиков программного обеспечения придерживаются пути «снимок – карта – ГИС». Таким образом, каждое программное решение является заточенным под определенную задачу, и для проведения полного цикла обработки требуется использовать 2-3 программы, что требует значительных временных и стоимостных ресурсов. Однако на российском рынке существует инновационное решение – программный комплекс «Image Media Center 5.0» (ИМС), полностью разработанный российской компанией «Центр инновационных технологий».

Автоматизированные алгоритмы обработки, реализованные в программном комплексе ИМС, позволяют анализировать не только пространственные, но и временные изменения, происходящие на территории исследований, выявлять наиболее интенсивные воздействия и классифицировать их сочетания.

Возможности обработки гиперспектральных данных в программном комплексе ИМС позволяют решать следующие задачи:

- обработка и анализ неограниченного количества спектральных каналов;

- отображение спектральных кривых в табличном и графическом видах;
- формирование библиотек спектрограмм;
- сравнение спектральных кривых между собой, поиск спектрограмм в библиотеке с определенным доверительным интервалом;
- поиск объектов на изображении по спектрограмме согласно величине доверительного интервала;
- формирование пространственных спектрограмм в срезе по строке, столбцу или произвольному профилю.

Для уверенного разделения объектов на снимке используются значения яркости объекта, зафиксированные в различных спектральных зонах, и их отображение в виде спектральных кривых (рис. 1).

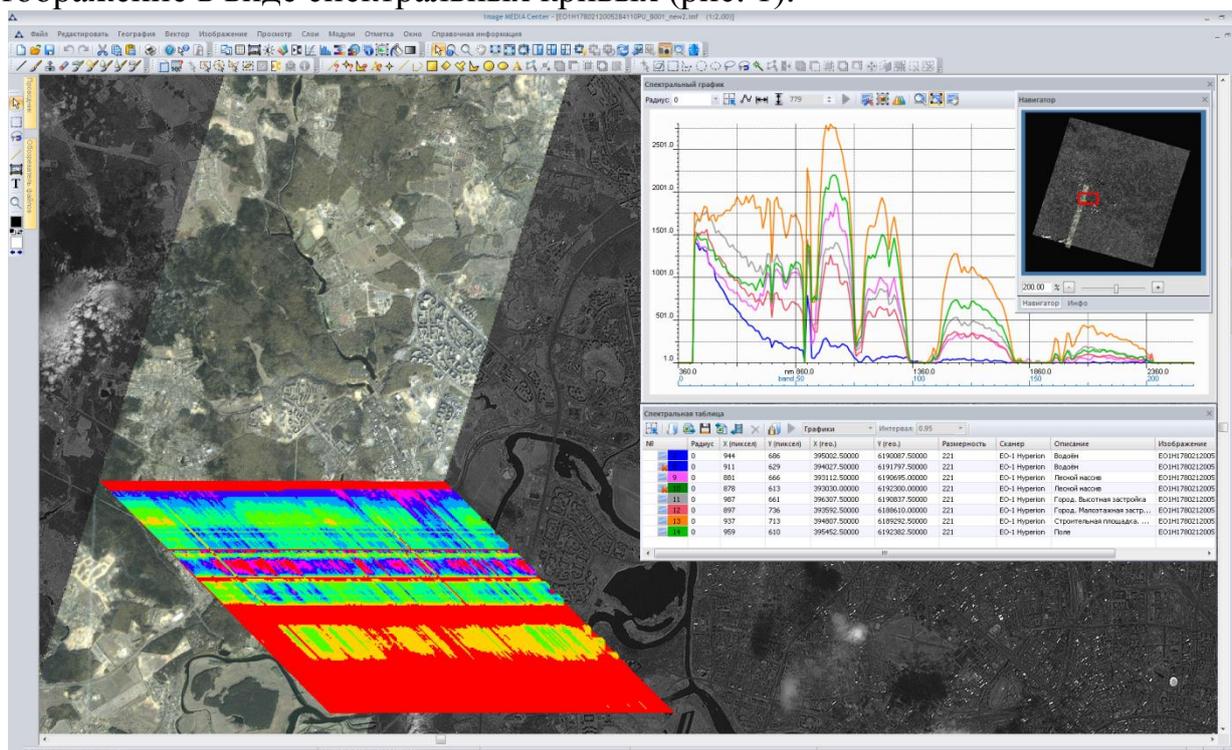


Рис. 1. Обработка гиперспектральных материалов EO-1 Hyperion в ПК ИМС. Гиперспектральное изображение наложено на снимок Landsat-7 для повышения пространственного разрешения с 30 м до 15 м

Результатом поиска объектов по спектрограмме в программном комплексе ИМС является черно-белое изображение, по которому производится автоматическая векторизация найденных объектов. Векторные объекты наполняются необходимой атрибутивной информацией, назначаются стили отображения. Таким образом, программный комплекс ИМС позволяет пройти путь от снимка к ГИС в едином информационном пространстве.

Обработка материалов космической съемки и извлечение ранее недоступной информации совместно с геоинформационным анализом дают в руки специалистов чрезвычайно мощный инструмент, позволяющий оперативно решать различные тематические задачи и принимать управленческие решения.

Методика и результаты полевых видеоспектральных исследований

Алексеев А.А., Шилин Б.В.

Центр экологической безопасности РАН, г. Санкт-Петербург

bshilin@rambler.ru

Видеоспектральная съёмка позволяет регистрировать отражённое или собственное излучение объектов с высоким пространственным и спектральным разрешением в видимом, ближнем инфракрасном и тепловом диапазонах с помощью видеоспектрометров – оптико-электронных приборов с приёмной матрицей и полихроматором, разлагающим в спектр излучение в пределах узкого телесного угла. Для полевых измерений видеоспектрометр был смонтирован на вращающейся платформе, позволяющей изменять угол наклона плоскости вращения прибора. В полевых условиях питание видеоспектрометра и регистрация материалов съёмки осуществляется компьютером. Проводилась видеоспектральная панорамная съёмка различных фоноцелевых ситуаций с целью оценить эффективность метода для получения фундаментальных данных о спектральных характеристиках компонентов ландшафта, в том числе в суточной и сезонной динамике и при изменении состояния окружающей среды. Для получения данных о коэффициентах спектральной яркости в пределах панорам устанавливались миры. Было получено большое количество монохромных узкоспектральных изображений фоноцелевых панорам и коэффициентов спектральной яркости различных естественных (в первую очередь, растительности) и антропогенных объектов. Все результаты хорошо согласуются с известными фундаментальными данными о спектральных характеристиках объектов.

Исследования показали, что полевая видеоспектральная съёмка является эффективным методом сбора информации о спектральных характеристиках объектов. Её производительность во много раз выше полевых измерений точечными полевыми спектрометрами. Только видеоспектральная съёмка позволяет сравнивать спектральные характеристики различных фоноцелевых ансамблей в один момент времени, что очень важно для изучения различного типа стресса растительности (недостаток или избыток влаги, загрязнения почвы и атмосферы, ионизирующие излучения). Из перспективных направлений вид отметим возможность оценки физиологического состояния человека.

Разработка алгоритмов эффективной тематической обработки данных гиперспектральных систем для идентификации объектов ландшафта

Григорьева О.В., Марков А.В., Бровкина О.В., Жуков Д.В.,
Мочалов В.Ф., Алексеев А.А.

Военно-космическая академии имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург
spb.vka@yandex.ru

При использовании материалов гиперспектральных (ГС) съемок поверхности Земли формируется многомерное спектральное пространство, которое позволяет выявить наиболее характерные детали объектов на снимках. Как показала практика обработки ГС данных, максимальная эффективность \mathcal{E} решения задачи идентификации объектов достигается только путем оптимизации следующих параметров:

$$\mathcal{E} = f(\Delta\lambda, n_\lambda, M, I, L),$$

где $\Delta\lambda$ – информативные спектральные интервалы, в которых объект в наибольшей степени выделяется на фоне; n_λ – количество спектральных каналов, используемых в классификации; M – критерии принятия решения в методе классификации; I – информативные признаки идентификации объекта; L – пространственное разрешение ГС данных.

На основе этого предложен общий методический подход к решению тематических задач мониторинга по данным ГС съемки в диапазоне 0,4...2,5 мкм низкого (30 м) и высокого (2 м) пространственного разрешения. Полный цикл интерпретации изображений гиперспектрального параллелепипеда (ГСП) реализован в разработанном нами для этих целей программном обеспечении (ПО). В зависимости от решаемой задачи алгоритмы, используемые в ПО, претерпевают обоснованные изменения. Во всех алгоритмах предусмотрен выбор и расчет набора признаков при классификации I , решающего правила классификации M , аналитическое описание образов, полученных в результате классификации или сегментации изображений, фильтрация неинформативных объектов.

В частности, в алгоритмах используется оригинальный способ комплексирования методов кластеризации с введением этапа реклассификации, позволяющим назначить обучающие выборки с использованием библиотеки спектральных признаков, интегрированной с ПО. Для автоматизированного сравнения спектральных сигнатур полученных образов со спектрами яркости, содержащимися в БД [1], используется подход, основанный на критериях сходимости, учитывающих форму спектров яркости и коэффициенты вариации значений сигналов. При необходимости осуществляется исключение «ложных» объектов по пространственно-морфологическим признакам.

В качестве основных методов кластеризации и классификации в алгоритмах используются методы Isodata, максимального правдоподобия Maxlike, спектральной угловой корреляции SAM, метод нечетких множеств

Fuzzy и др. При этом в ходе исследований установлены закономерности влияния на результат кластеризации количества и состава ГС каналов.

Например, при использовании алгоритма Isodata рекомендуется выбирать каналы, где между спектральными сигнатурами объекта и фона не наблюдается инверсии, поскольку в качестве критерия принадлежности пикселя к кластеру используется сумма квадратов разностей (исследования водных объектов). Для анализа состояния растительного покрова, представляющего собой сложные комплексы объектов с различными спектральными отражательными свойствами на изображениях с пространственным разрешением порядка 2 м на пиксель, эффективны статистические методы максимума правдоподобия или квадратичное расстояние Махаланобиса, однако если число спектральных каналов будет невелико (менее 40). Напротив, метод SAM эффективен для классификации объектов в более чем двадцати спектральных каналах или для сегментации территории только на два класса в случае более 20 каналов.

Достаточно хорошо зарекомендовал себя метод нечетких множеств, реализация которого в ПО позволяет использовать в качестве меры разделения классов как метрику Махаланобиса, так и Евклидову метрику или диагональную норму. В этом случае вероятность отнесения класса к искомому объекту можно улучшить путем выбора оптимальных параметров кластеризации. Это связано с тем, что увеличение числа спектральных каналов, участвующих в процессе классификации, прямо пропорционально необходимости уменьшения невязки в методе Fuzzy, однако ведет к увеличению количества итераций и затратам машинного времени.

Разработанный методический подход применялся нами при решении задач выявления и определения степени лесовозобновления на вырубках и гарях, разбиении водной поверхности по классам неоднородностей, обусловленных присутствием в воде оптически активных примесей и др. [2, 3].

Апробация изложенной выше методики проводилась с использованием результатов съемки опытными образцами авиационных видеоспектрометров «Фрегат» и НПО «Лептон», а также по материалы космической ГС съемки КА EO-1 Nuregion одних и тех же территорий Карельского перешейка.

Литература

1. Григорьева О.В., Чапурский Л.И. Проблемы создания и информационного наполнения базы данных по коэффициентам спектральной яркости объектов наземных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. Том 9. Номер 3. – М.: ООО «ДоМира», 2012. – С.18-25.

2. Бровкина О.В., Скорописов Д.Ю. Мониторинг свалок твердых бытовых и промышленных отходов (на примере территории Кронштадского района г. Санкт-Петербург) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. Том 9. Номер 1. – М.: ООО «ДоМира», 2012. – С.153-155.

3. Григорьева О.В., Саидов А.Г., Панин А.В. Индикатор состояния почвогрунтов в районах обращения нефти и нефтепродуктов, полученный неконтактными средствами наблюдений // Экология и промышленность России. – 2010. – № октябрь. – С.50-53.

Использование гиперспектральной съемки в диапазоне 0,4-2,5 мкм для идентификации участков деградации лесов в районе подтопления и аэрогенного загрязнения территорий

Григорьева О.В., Жуков Д.В., Чапурский Л.И., Терентьева В.В.
Военно-космическая академии имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург
spb.vka@yandex.ru

Задача оценки сохранения лесных массивов становится все более актуальной в связи с возрастающей антропогенной нагрузкой на природные комплексы. Не смотря на то, что дистанционные методы обнаружение негативных изменений лесов уже достаточно хорошо проработаны, нерешенным остается вопрос, связанный с установлением причины деградации для ее своевременной локализации. На сегодняшний момент можно рассмотреть две основные причины гибели лесов в районе интенсивного хозяйственного освоения территорий – аэрогенное воздействие за счет выбросов аэрозольно-дымовых загрязнений в воздух и изменение условий произрастания древостоя вследствие нарушения гидрологического режима местности (заболачивания) или загрязнении почв.

В работе предлагается новый подход к оценке участков деградации древесной растительности по данным гиперспектральной (ГС) съемки в диапазоне 0,40-2,50 мкм, позволяющей за счет высокого спектрального разрешения и регистрации излучения в широком диапазоне спектра выделить наиболее информативные спектральные каналы для обнаружения объекта среди всех элементов фона. В качестве ГС данных использовались материалы космической съемки низкого пространственного разрешения (30 м) КА EO-1 Hyperion. Использование этих данных в качестве тестовых позволяет в первом приближении оценить перспективы идентичной по пространственному разрешению готовящейся к запуску ГС аппаратуры (например, КА «Ресурс-П», видеоспектрометр НПО «Лептон»). Анализировались участки территории, подвергнутые аэрозольному загрязнению в районе крупного мегаполиса (г. Санкт-Петербург), и районы вымокания, приуроченные к транспортным магистралям в Лебяжьеvском районе Курганской области, образовавшиеся за счет перегораживания сильно уплотненными насыпями дорог унаследованных линий поверхностного и подповерхностного стока внутри водосборов озер.

Предварительно осуществлялась атмосферная коррекция данных для калибровки пикселей в коэффициентах спектрального отражения (КСО) с использованием пакета РСМODWIN3.

Непосредственно тематическая обработка осуществлялась в два этапа. На первом идентифицировался факт нарушения с использованием спектральных каналов в интервале от 0,45-1,00 нм (диапазон менее 0,45 мкм не рассматривался из-за низкой спектральной чувствительности датчика). При этом учитывались спектральные различия между разными стадиями деградации

участков леса в районе вымокания. Данные различия оценивают в основном с помощью вегетационных индексов (н., NDVI), однако зачастую эта разница незначительная. Как показал анализ, при использовании ГС данных наилучшим является оценка особенностей поведения спектра в диапазоне от 0,50 до 0,80 мкм, в том числе в области инфракрасного склона 0,69-0,74 мкм, в пределах которой наблюдается смещение основной полосы поглощения хлорофилла на величину в несколько нанометров в сторону более коротких волн при возникновении стрессовой ситуации и появлении признаков увядания.

В этом случае в качестве метода обнаружения смещения и локальных точек перегиба (максимального наклона) спектра были найдены следующие признаки, основанные на:

- оценки характеристик «вектора смещения», полученного пространственно-масштабируемой фильтрацией в результате разности исходного спектра и сдвинутого на несколько нанометров (не более 10 нм) вдоль оси длин волн;

- показателях автокорреляционной функции (АКФ) спектра в интервале 0,69...0,78 мкм;

- компонентах собственных чисел ковариационной матрицы, полученных в трех спектральных каналах со средними длинами волн 0,55, 0,72 и 0,80 мкм.

Наиболее чувствительны к степени деградации растительности являются первые две группы признаков, в частности положительные и отрицательные максимальные амплитуды спектров смещения и АКФ; длины волн, на которые приходится максимальные амплитуду и нулевые значения. Так наблюдается полная инверсия максимальных амплитуд «вектора смещения» для деградированных и неповрежденных лесных массивов в спектральных каналах от 712 нм до 773 нм. При этом, чем больше степень деградации, тем в 1,5 раза меньше локальный максимум. При анализе АКФ был выделен спектральный канал 722-738 нм, в пределах которого величина АКФ уменьшается с увеличением стадии деградации от 0,4 для здорового леса до 0 для полностью деградированных древостоев.

Однако использование указанного подхода не может выявить причину ослабления и усыхания древостоя так, как в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Поэтому на втором этапе наиболее эффективным оказалось использование индексов оценки содержания влаги в почвенно-растительном пологе группы Canopy Water Content. Наилучшие результаты были получены при применении индекса NDWI, рассчитанного в узких спектральных каналах со значениями длин волн 857 и 1241 нм, оценить которые можно только с использованием данных ГС съемки. При этом принято считать, что высокое содержание влаги характерно для здоровой растительности, которая больше, чем деградированные древостои, поглощает излучение в этом интервале. Однако переувлажненные участки деградации лесов характеризуются еще более низкими значениями индекса NDWI по сравнению со здоровым лесом вне района вымокания, поскольку оставшаяся лесная подстилка на заболоченных землях содержит достаточно большое количество влаги для

поглощения излучения. У поврежденного же леса на сухих почвах коэффициенты отражения в диапазоне 1200...1300 нм намного выше. Эта закономерность дает возможность получить новую информацию об нарушенных лесах.

Таким образом, было получено, что:

– стадии деградации древостоев могут быть выявлены в результате применения алгоритма автоматизированной обработки материалов ГС с использованием ограниченного состава спектральных каналов и разрешением около 10 нм;

– результат комплексного применения индекса NDWI и показателей смещения спектральных сигнатур позволяет не только идентифицировать участки повреждения древостоев, но и предположить причину негативных изменений;

– аналогичные исследования особенностей «вектора смещения» и АКФ могут быть использованы для идентификации других классов ландшафтов, в том числе для установления пороговых значений спектрального разрешения, при котором эти особенности могут быть выделены.

Полученные возможности были реализованы в специальном программном обеспечении, автоматизирующем весь цикл обработки, включая представление результатов в векторной форме для дальнейшего анализа в ГИС.

Методика формирования спектральных характеристик объектов на основе мультिवременных данных космической гиперспектральной съемки

Григорьев А.Н.

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

Grig-AN@ya.ru

В процессе эксплуатации оптических систем дистанционного зондирования Земли для одного объекта и участка местности возможно накопление мультिवременного ряда данных, относящихся к различным сезонам и фенологическим фазам. Не являются исключением системы гиперспектральной съемки, позволяющие в отличие от многоспектральных систем, получать детальные спектральные характеристики объектов, сопоставимые по информативности с результатами лабораторной и полевой спектрометрии. В вопросах исследования временной динамики изменений спектральных свойств объектов целесообразным является применение гиперспектральных приборов космического базирования, способных обеспечивать высокую регулярность наблюдений [1]. Ярким примером является аппаратура Hyperspec на малом космическом аппарате (МКА) EO-1 (Earth Observing-1), запущенном NASA в рамках программы «Новое тысячелетие». Результаты съемки в открытом виде доступны для пользователей и их объем позволяет выделить мультिवременные ряды снимков для одного участка местности. Объем выборки может составлять от нескольких единиц-десятков снимков (например, на территорию городов Москвы и Санкт-Петербурга, рис. 1) до сотен (г. Вашингтон).

1) 5 апреля 2012 г.

2) 9 мая 2012 г.

3) 29 июля 2012 г.

4) 20 авг. 2011 г.

5) 10 сент. 2011 г.

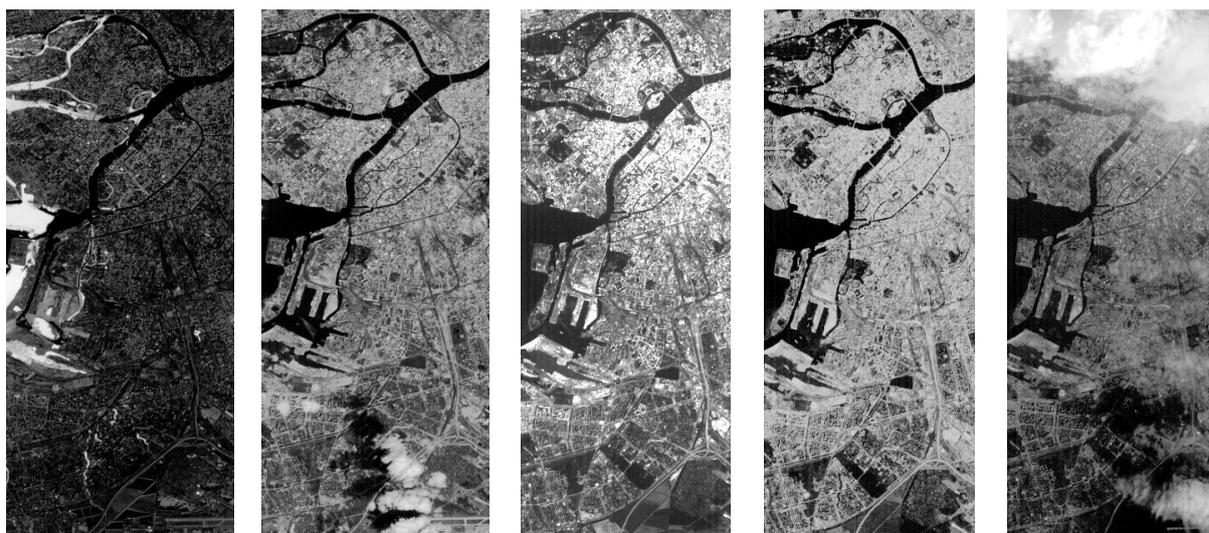


Рис. 1. Фрагменты мультिवременных изображений спектральных каналов (г. Санкт-Петербург, EO-1 / Hyperspec, 550 нм)

Отечественные средства космической видеоспектрометрии также достигли этапа практической реализации. В настоящее время уже выведен на

орбиту экспериментальный МКА ФКИ с видеоспектрометром на борту (разработчик – ЗАО «НПО «Лептон»), а в ближайшей перспективе ожидается запуск КА Ресурс-П с комплектом аппаратуры, в котором присутствует гиперспектральный прибор ГСА, разработанный ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева». Указанные приборы демонстрируют конкурентоспособные тактико-технические характеристики.

Существенным фактором, сокращающим объемы мультिवременной выборки, является наличие облачности над наблюдаемой территорией, относящейся к группе внешних искажающих факторов. Кроме внешних в оптико-электронной гиперспектральной аппаратуре действуют внутренние факторы, вносящие систематические и случайные шумы в регистрируемую информацию [2]. Указанные особенности получения мультिवременных гиперспектральных данных требуют разработки специальных подходов к их обработке и анализу, что нашло отражение в представляемой методике формирования спектральных характеристик объектов. Методика содержит следующие основные этапы:

1. Выбор гиперспектральных снимков по критерию общего покрытия облачностью.

2. Атмосферная коррекция гиперспектральных снимков с использованием модели переноса излучения в атмосфере.

3. Вычисление масок облачности для каждого снимка с последующим формированием единой мультिवременной маски наблюдаемой территории.

4. Выбор исследуемых объектов в пределах мультिवременной маски.

5. Формирование выборки и оценивание ее качества.

6. Статистическая обработка результатов измерений.

7. Сопоставление и анализ спектров объектов.

Первый опыт использования предложенной методики подтвердил стационарность спектральных свойств антропогенных объектов и компонентов неживой природы, а также позволил выявить комплексную динамику сезонных изменений объектов различных видов растительности [3].

Литература

1. Космические системы дистанционного зондирования Земли: обработка данных: учебное пособие / А.И. Алтухов, А.Н. Григорьев, Н.В. Гнусарев, Е.В. Козин – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2011. – 369 с.

2. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений – М.: Техносфера, 2010. –560 с.

3. Григорьев А.Н., Шилин Б.В. Фенологические и статистические аспекты обработки данных космического видеоспектрометра HYPERION // X Междунар. конф. «Прикладная оптика–2012»: сборник трудов, октябрь 2012 г.: Оптическое общество им. Д.С. Рождественского и др. – СПб., 2012.

Топографическая радиометрическая коррекция данных космической гиперспектральной съемки

Григорьев А.Н.

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург
Grig-AN@ya.ru

Известным фактором, вызывающим искажения данных дистанционного зондирования Земли, является топография местности, а именно ее рельеф с элементами крупных и средних форм. Данный вид искажений особенно сильно проявляется в случае ведения космической съемки, обладающей большей обзорностью по сравнению с воздушными наблюдениями. Подобные искажения имеют как геометрический, так и радиометрический характер. В настоящее время для коррекции геометрических искажений существуют и хорошо апробированы методы физического и типового ортотрансформирования, так как они развивались с момента внедрения в практику традиционной панхроматической съемки, зачастую используемой для задач координатометрии.

С появлением новых методов мультиспектральной съемки (многоспектральной и гиперспектральной) требуется выполнять топографическую коррекцию зарегистрированных данных не только в геометрическом, но и в радиометрическом отношении. Приведенное утверждение обусловлено тем фактом, что рассматриваемый вид многомерных данных в большей степени предназначен для автоматизированной тематической обработки, отчасти основывающейся на методах спектрометрии. Топографические радиометрические искажения хорошо иллюстрируются на примере появления различий в спектрах объектов одного класса, расположенных на участках местности с различными уклонами рельефа [1] и, следовательно, с различной освещенностью (рис. 1).



Рис. 1. Участок местности с неравномерной освещенностью (окрестности г. Геленджика, EO-1 / Hyperion, 750 нм)

Семейство спектров для объектов одного класса на примере древесной растительности, полученных на участках местности с различными уклонами (от 0° до 45°) представлено на рис. 2.

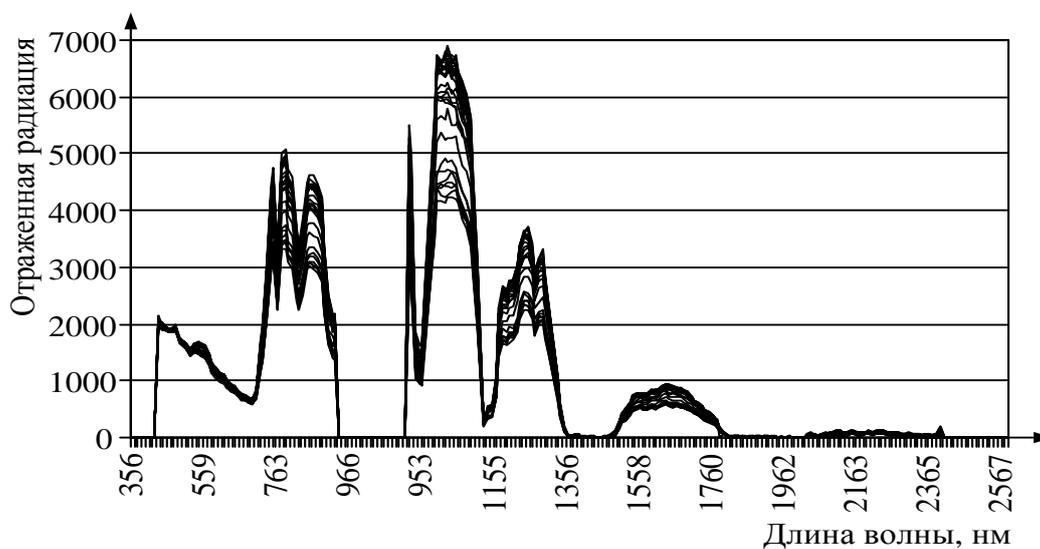


Рис. 2. Спектры древесной растительности, искаженные топографией местности

Также в рассматриваемой задаче необходимо учитывать существование сложных функций, определяющих относительное угловое распределение яркости отраженного излучения, — индикатрис отражения [2], уникальных для каждого класса объектов в своем состоянии.

В докладе рассматриваются существующие подходы к восстановлению спектральных характеристик объектов и возможность их применения для коррекции данных космической гиперспектральной съемки. В качестве основной исходной информации для выполнения коррекции используются:

1. Гиперспектральные снимки с выполненной атмосферной коррекцией.
2. Цифровые модели рельефа местности с пространственными характеристиками, соответствующими характеристикам обрабатываемых снимков.
3. Внешние условия регистрации снимков (высота и азимут Солнца).

Получены результаты топографической радиометрической коррекции данных космической гиперспектральной съемки на примере снимков системы EO-1 / Nuregion для различных типов ландшафта, выполнено оценивание качества обработки с использованием наборов объектов-аналогов.

Литература

1. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений — М.: Техносфера, 2010. — 560 с.
2. Мишев Д. Дистанционные исследования Земли из космоса: Пер. с болг. — М.: Мир, 1985. — 232 с.

Калибровка шкалы длин волн гиперспектрометра

Архипов С.А., Бутяйкин Н.А., Гасич Г.В., Линько В.М., Ли А.В.,
Лузганова М.Ю., Морозов С.А.

ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»

bna@zenit-kmz.ru

Морозова С.П., Панфилов А.С.

ФГУП «ВНИИОФИ», г. Москва

panfilov-m4@mail.ru

Шкала длин волн (ШДВ) гиперспектрометра - распределение длин волн в изображении спектра по номерам строк ФПЗС (по номерам строк в кадре изображения). В гиперспектральной аппаратуре (ГСА) с призмным дисперсионным устройством (ПДУ) ШДВ нелинейная, что приводит к перепаду спектрального разрешения (рис. 1) и, соответственно, выходного сигнала.

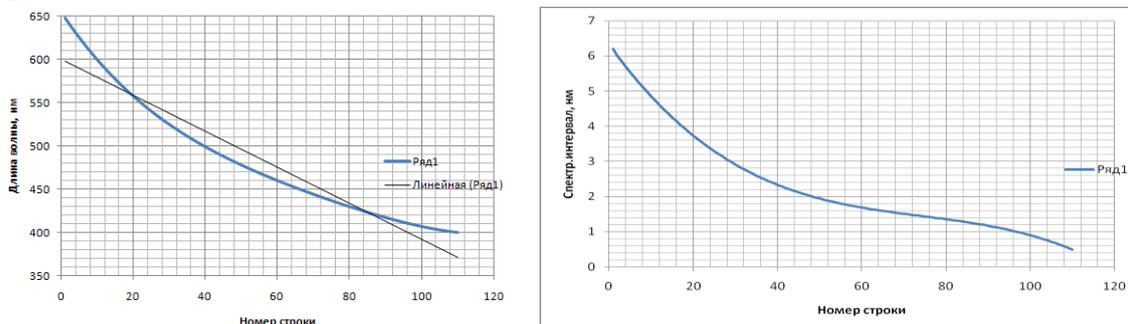


Рис. 1 – Графики ШДВ (слева) и интервалы спектральной выборки (справа) ГСА (канал ВД1).

Для снижения нелинейности ШДВ в ГСА с ПДУ применяется аналоговое бинирование строк в спектре изображения входной щели спектрометра по специальном алгоритму. Это позволяет снизить разброс спектрального разрешения (рис. 2) на интервале чувствительности и улучшить отношение сигнал/шум в спектре.

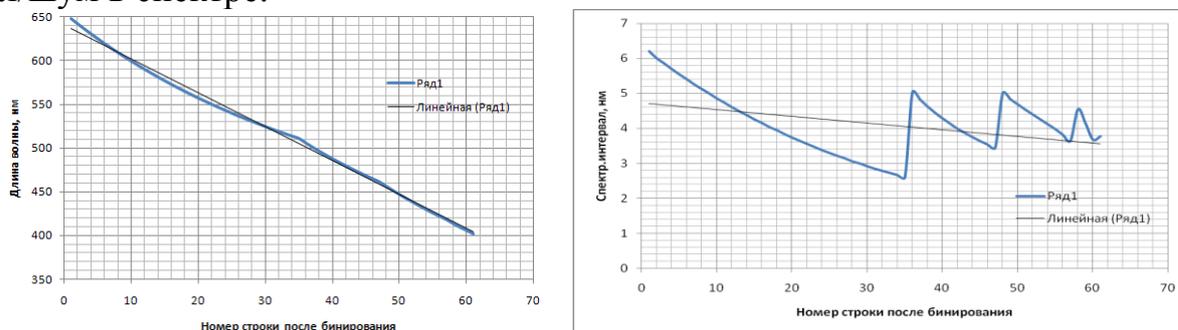


Рис. 2 – Графики ШДВ (слева) и интервалы спектральной выборки (справа) ГСА с ПДУ после бинирования строк.

От точности определения положения каждой спектральной зоны на ШДВ зависит качество радиометрической калибровки ГСА.

В докладе на примере ГСА РП рассматриваются технологические и методические особенности определения ШДВ гиперспектрометра с

призменным дисперсионным устройством, а также способ обеспечения контроля и коррекции ШДВ по эталонному сигналу от блока калибровки при эксплуатации аппаратуры.

Калибровка чувствительности гиперспектрометра

Архипов С.А., Бутяйкин Н.А., Линько В.М., Ли А.В.,
Лузганова М.Ю., Морозов С.А.

ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»

bna@zenit-kmz.ru

Морозова С.П., Панфилов А.С.

ФГУП «ВНИИОФИ», г. Москва

panfilov-m4@mail.ru

Калибровка чувствительности гиперспектрометра - это процедура определения параметров преобразования цифрового массива видеоинформации, получаемого с выхода ГСА (ур. АЦП), в значения СПЭЯ ($\text{Вт/ср.}\cdot\text{м}^2\cdot\text{мкм}$) на входном зрачке аппаратуры.

Методика калибровки предполагает, что ГСА линейна в динамическом диапазоне входного сигнала, т.е. входное воздействие и выходной сигнал связаны градуировочной характеристикой вида $L=(AN+B)$.

В процессе наземной калибровки ГСА определяются поэлементные коэффициенты коррекции чувствительности (ККЧ), использование которых позволяет устранить неоднородность чувствительности ГСА и по полю зрения и по спектру (рис. 1).

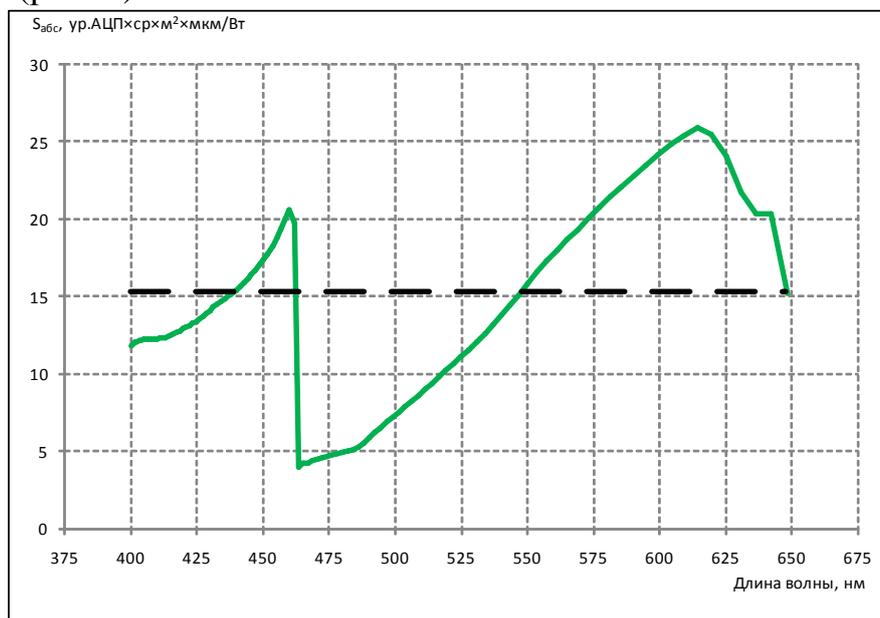


Рис. 1 - Абсолютная спектральная чувствительность канала ВД1 ГСА до и после (пунктирная линия) применения ККЧ.

В докладе, на примере аппаратуры ГСА РП, рассматриваются технологические и методические особенности определения поэлементных коэффициентов коррекции чувствительности (ККЧ) гиперспектрометра, позволяющих характеризовать абсолютную чувствительность в диапазоне спектра (крутизну градуировочной характеристики «А») ГСА одним значением.

Оптимизация параметров экспонирования ГСА РП

Гасич Г.В., Линько В.М., Лузганова М.Ю.
ОАО «Красногорский завод им. С.А.Зверева»
lwm@zenit-kmz.ru

Планирование съемки при эксплуатации гиперспектральной аппаратуры (ГСА) КА «Ресурс-П» предполагает выбор параметров режима, обеспечивающих оптимальные условия экспонирования.

Настраиваемые экспонетрические параметры ГСА, определяемые по результатам экспонетрического расчета:

- массив коэффициентов усиления видеосигнала (МКУС),
- массив коэффициентов бинирования элементов приемника по столбцу (КБСБ);
- массив коэффициентов бинирования элементов приемника по строке (КБСТ);
- код коэффициента деления частоты кадров (ККДЧК).

Экспонетрические параметры режима съемки выбираются на основании:

- требований заказчика съемки к спектральному разрешению;
- параметров орбитального движения КА и условий визирования;
- прогноза спектрального пропускания атмосферы на маршруте по данным метеоизмерений, имеющимся на момент планирования,
- оценки диапазона изменения КСЯ на маршруте с использованием базы данных КСЯ для диапазона длин волн 0,4-1,0 мкм для основных типов подстилающей поверхности, встречающихся в районах съемки КА и их сезонных изменений.
- чувствительности ГСА по данным формуляра радиометрических параметров.

Предварительная обработка гиперспектральной видеоинформации ГСА РП

Архипов С.А., Бутяйкин Н.А., Ли А.В., Линько В.М., Лузганова М.Ю.
ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»
luzm@zenit-kmz.ru

Процесс восстановления и предварительной обработки информации дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), получаемой от гиперспектральной аппаратуры (ГСА РП), установленной на КА «Ресурс-П», имеет сложную и многоступенчатую структуру. Кроме того, ГСА РП имеет ряд схемных особенностей, которые определяют специфику предварительной обработки гиперспектральной информации до стандартного уровня 1 (в соответствии с международной классификацией уровней обработки).

Задачу предварительной обработки гиперспектральной информации ГСА РП можно разбить на несколько функциональных составляющих:

- модуль анализа целевой информации, включающий оценку целостности поступившей информации, фильтрацию сбоев и восстановление бортовой шкалы времени;

- модуль формирования кадра видеоинформации, включающий структурное восстановление кадра видеоинформации с каждого ОЭП'а (каналы ВД1/ВД2) и учет влияния фоновой составляющей (строки пересканирования);

- модуль радиометрической коррекции, включающий проведение радиометрической коррекции видеоинформации в каждом канале с использованием массивов коэффициентов коррекции для установленной на режим съемки конфигурации параметров, коррекцию сигналов с дефектных элементов и расчет спектральной плотности энергетической яркости на входном зрачке ГСА РП для области спектральной чувствительности каждого канала;

- модуль геометрической коррекции, включающий сшивку видеоинформации с двух каналов (ВД1 и ВД2) по временной, пространственной и спектральной координатам;

- модуль атмосферной коррекции, включающий определение спектральной плотности энергетической яркости и коэффициентов спектральной яркости на уровне подстилающей поверхности с использованием массивов параметров атмосферы.

Дополнительно обработка информации включает:

- выделение файла протокола измерительного цикла (ПИЦ) и его анализ;
- оперативный контроль положения шкалы длин волн - контроль соответствия положения спектральных реперов в каждом канале их эталонному значению.

Исследование спектральных свойств северной растительности по данным наземных измерений гиперспектрометром и многоканальным спектрометром

Тутубалина О.В., Зимин М.В., Голубева Е.И.,
Краснушкин А.В., Михеева А.И.,
географический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, г. Москва
olgatut@mail.ru

В докладе представлены результаты обработки серий измерений образцов растительности, выполненных в июле 2012 г. в центре Кольского полуострова с помощью полученного по Программе развития МГУ гиперспектрометра ASD FieldSpec 3 Hi-res и четырехканального спектро-метра SkyeInstruments SpectroSense 2+. Исследования проводились по нескольким направлениям:

1) гиперспектрометрические измерения образцов листьев березы и ивы, отобранных в зоне аэротехногенного воздействия комбината "Североникель" (Мончегорск), проводимые сопряженно с лабораторным пигментным анализом;

2) сопряженные измерения образцов лишайников, кустарничков и травянистых растений, произрастающих в естественных условиях в Хибинских горах: выполнялись гиперспектрометром в разных режимах измерений (контактно, бесконтактно) и четырехканальным спектрометром, варьировались условия измерений (in situ и предварительно отобранные образцы);

3) суточные измерения динамики спектральных свойств северной растительности, проведенные неподвижно закрепленным четырехканальным спектрометром, в условиях сплошной облачности и в условиях ясной погоды.

Результаты работ позволяют дать рекомендации по сопряженному использованию четырехканальных и гиперспектральных данных наземных измерений, а также многозональных и гиперспектральных космических снимков для изучения состояния и динамики северной растительности.

Секция 6

Пассивное радиовидение в миллиметровом диапазоне

Пирогов Ю.А.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва
yupi937@gmail.com

Пассивное радиовидение в миллиметровом диапазоне становится исключительно популярным из-за вновь открывшихся возможностей для создания компактных бортовых средств всепогодного видения для слепой посадки летательных аппаратов, аппаратуры обзора прибрежных акваторий, видения объектов, скрытых непрозрачным для оптических излучений камуфляжем. Миллиметровые волны (ММВ) наиболее приемлемы в радиовидении. Они являются самыми короткими из радиоволн, свободно пропускаемых атмосферой, обеспечивая вместе с тем максимальное разрешение среди устройств всепогодного радиовидения. В отличие от видимых, инфракрасных и субмиллиметровых излучений миллиметровые волны легко проникают сквозь гидрометеоры – дымку, туман, снег, дождь, дымовые завесы и т.п. К тому же в отличие от активных систем пассивное радиовидение обеспечивает абсолютную скрытность наблюдения.

Однако имеется два принципиальных недостатка ММВ видео устройств: малое по сравнению с оптическими системами пространственное разрешение и невысокое быстродействие. Второй недостаток преодолевается с применением решеток сенсоров, реализующих в радиометрии регистрацию 2-мерных тепловых сцен в реальном масштабе времени. Для улучшения же пространственного разрешения необходимо преодолеть рэлеевский порог разрешения. Поскольку возможности увеличения диаметра приемных антенн радио-оптических систем весьма ограничены, повышение разрешения может быть достигнуто только посредством математической обработки полученных радиоизображений, т.е. с использованием режима сверхрэлеевского разрешения, называемого сверхразрешением.

В настоящем сообщении дается краткий обзор выполненных на физическом факультете и в Центре магнитной томографии и спектроскопии (ЦМТС) МГУ работ по радиовидению в миллиметровом диапазоне при использовании режимов сверхразрешения в системах с одноэлементными приемниками и решетками сенсоров. В системах радиовидения 8-мм диапазона с помощью математической обработки образов реальных радиотепловых сцен, с учетом прецизионно измеренной аппаратной функции, получено 10-кратное улучшение пространственного разрешения. Системы ближнего радиовидения 3-мм диапазона обеспечивали пространственное разрешение 4-5 мм при обнаружении спрятанных под одеждой предметов из металла, керамики, емкостей с жидкостью и др. Показано, что физическая причина сверхразрешения заключается в алгоритмическом усилении высших пространственных гармоник радиотепловых изображений, причем предельная величина сверхразрешения определяется отношением сигнала к шуму в поле зрения измеряемых сцен.

Сверхразрешение в системах пассивного радиовидения

Батова С.С., Пирогов Ю.А., Чуличков А.И.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва
teka-kor@yandex.ru

В системах формирования изображений из-за конечной ширины диаграммы направленности антенн регистрирующих систем довольно часто многие особенности изображения, характеризующие исследуемый объект, оказываются смазанными и неразличимыми. Увеличить разрешение путем технического совершенствования измерительных систем достаточно трудно. Однако если известна математическая модель, в соответствии с которой формируется изображение, и задан класс наблюдаемых сцен, то увеличить разрешение можно с помощью методов теории измерительно-вычислительных систем [1,2]. Эта проблема решается путем математического преобразования (редукции) результата измерения к виду, какой он имел бы при использовании "идеальной" регистрирующей системы с разрешением, возможно, более высоким, чем позволяют дифракционные и другие ограничения [1].

В теории измерительно-вычислительных систем сверхвысокого разрешения (ИВС СВР) выходной сигнал измерительного прибора преобразуется к виду, свойственному измерению состояния исследуемого объекта с помощью идеального измерительного прибора. Если известна математическая модель, связывающая экспериментальные данные с параметрами объекта, то решается задача редукции измерения к выходному сигналу идеального прибора с максимально возможной точностью [1,2]. Подход теории ИВС, основанный на максимизации точности оценок, делают ее методы весьма эффективными для решения задач интерпретации данных.

Для построения ИВС необходима математическая модель системы «объект – среда – прибор», отражающая свойства изображаемой сцены, среды и прибора, регистрирующего изображение. Называемая в теории ИВС *моделью измерения*, она описывает изучаемый объект вектором f , который интерпретируется как идеальное изображение (полученное на системе с дельта-образной аппаратной функцией), поступающее на вход системы регистрации. Преобразования изображения, происходящие в процессе его регистрации, описываются линейным оператором A , выходное изображение которого Af затем оцифровывается. Результат регистрации, искаженный шумом v , задается изображением ξ - *выходным* измерительной компоненты ИВС. В теории ИВС также считается заданной математическая модель U , связывающая входное изображение f измерительной компоненты ИВС с изображением Uf , полученным на гипотетическом измерительном приборе (системе регистрации), разрешение которого (например, ширина аппаратной функции) существенно выше, чем у реально используемой системы регистрации. Эта модель называется моделью интерпретации измерения.

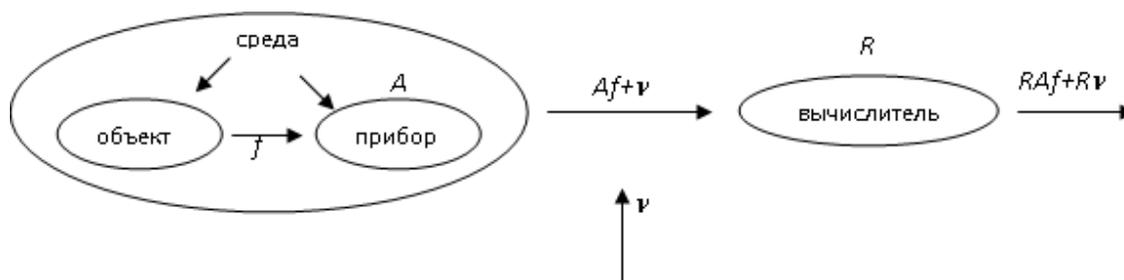


Рис. 1. Схема ИВС сверхвысокого разрешения.

(Сигнал f от сцены (объекта) поступает на вход системы регистрации A , выходное изображение Af регистрируется, причем процесс регистрации сопровождается погрешностью ν , результат регистрации $\xi = Af + \nu$ подается на вход вычислителя, работающего по алгоритму R ; в случае линейного алгоритма на выходе вычислителя получается оценка $U\hat{f}$ изображения Uf : $U\hat{f} = RAf + R\nu$.)

Для оценки идеального изображения Uf результат $\xi = Af + \nu$ регистрации изображения подается на вход вычислителя, работающего по алгоритму R , в случае линейного алгоритма на выходе вычислителя получается оценка $U\hat{f}$ изображения Uf : $U\hat{f} = RAf + R\nu$.

Алгоритм работы вычислительной части ИВС СВР строится, исходя из математической модели измерительного тракта и таким образом, чтобы оценка $U\hat{f}$ была как можно ближе к оцениваемому изображению Uf . Разрешение и уровень шумов на выходе ИВС СВР, помимо конструкции измерительного прибора, в значительной степени определяется математическими свойствами модели и тем, насколько точно математическая модель описывает реальную систему. Оценка вектора Uf , получаемая преобразованием R из изображения ξ , называется редукцией измерения к виду, какой имел бы результат измерения сигнала f с помощью заданного измерительного прибора U .

Приводятся конкретные примеры применения разработанных алгоритмов при обработке 2-мерных изображений в оптике и пассивном радиовидении в рамках реального [3] и вычислительного экспериментов.

Литература

1. Пытьев Ю.П. Методы математического моделирования измерительно-вычислительных систем.- М.: Физматлит, 2011. – 400с.
2. Чуличков А.И. Основы теории измерительно-вычислительных систем сверхвысокого разрешения. Линейные стохастические измерительно-вычислительные системы.- Тамбов:Изд-во Тамбовского гос. тех. ун-та, 2000. – 140с.
3. Пирогов Ю.А. Пассивное радиовидение в миллиметровом диапазоне. Изв. вузов. Радиофизика, 2003, т.46, №8-9, с.660-670.

Многоспектральные системы для субмиллиметрового диапазона на основе субММ-ИК конвертера

Паулиш А.Г., Федоринин, В.Н.

Филиал Института физики проводников СО РАН «КТИПМ», г. Новосибирск

Кузнецов С.А., Аржанников А.В.

Лаборатория перспективных исследований миллиметрового и терагерцового излучения, Новосибирский государственный Университет, г. Новосибирск

paulish63@ngs.ru

Разрабатываемые в данной работе детекторы миллиметрового (ММ) и субмиллиметрового (субММ) излучения основаны на принципе конверсии миллиметрового излучения в инфракрасное излучение с последующим детектированием высокочувствительной болометрической ИК камерой [1,2]. Конвертер ММ излучения в ИК излучение представляет собой многослойную структуру, состоящую из резонансного ультратонкого поглотителя на основе метаматериалов [3], на обратную сторону которого нанесен тонкий эмиссионный слой с коэффициентом черноты близким к 1. Поглощение ММ-излучения заданной частоты приводит к нагреву поглотителя и увеличению ИК излучения со стороны эмиссионного слоя, которое регистрируется ИК камерой. Толщина конвертера составляет несколько микрон, что обеспечивает его низкую теплоемкость и, тем самым, высокую чувствительность и быстродействие детектора. Существенным преимуществом такого схемотехнического решения является то, что детектор не имеет ограничений на общий размер матрицы, так как считывание информации с матрицы происходит оптическим методом. Это существенно для визуализации излучения с длиной волны порядка одного миллиметра, где общий размер преобразователя должен быть много больше рабочей длины волны. Например, для излучения с длиной волны 1 мм, сочетающим достаточно высокую проникающую способность и приемлемое пространственное разрешение, размер матрицы должен составлять более 50 мм. Кроме того, на поверхности одного поглотителя, обращенной к миллиметровому излучению, можно разместить несколько типов фрагментов частотно-избирательных поверхностей (матрицу) имеющих разную спектральную и поляризационную чувствительность. Это позволяет по единой технологии изготавливать многоспектральные детекторы с заданным набором рабочих длин волн к тому же имеющих поляризационное разрешение. Добавление функции поляризационного разрешения позволяет увеличить контраст изображения и выделить из него нужную информацию.

Схема изготовленного матричного многоспектрального поглотителя показана на рисунке 1. Структура содержит четыре типа фрагментов частотно-избирательных поверхностей (ЧИП) – пикселей. Три пикселя с резонансными частотами 0.30, 0.33 и 0.36 ТГц имеют одинаковую поляризационную чувствительность (показана стрелками на рисунке 1). Четвёртый пиксель с резонансной частотой 0.33 ТГц имеет поляризационную чувствительность

ортогональную первым трём. Таким образом, на частоте 0.33 ТГц может быть определено направление поляризации падающего линейно поляризованного света путём сравнения сигналов с двух ортогонально ориентированных пикселей. На рисунке обозначены: MS – метаповерхность, PP – полипропилен, “GL” – металлический слой, AIS – поверхность с искусственным импедансом, EL – эмиссионный слой. Размеры элементов указаны в миллиметрах. Направление поляризации, соответствующее максимальной чувствительности, показано стрелками, резонансная частота указана рядом в ТГц. Для улучшения восприятия фрагменты ЧИП с разной спектральной чувствительностью окрашены в разные цвета.

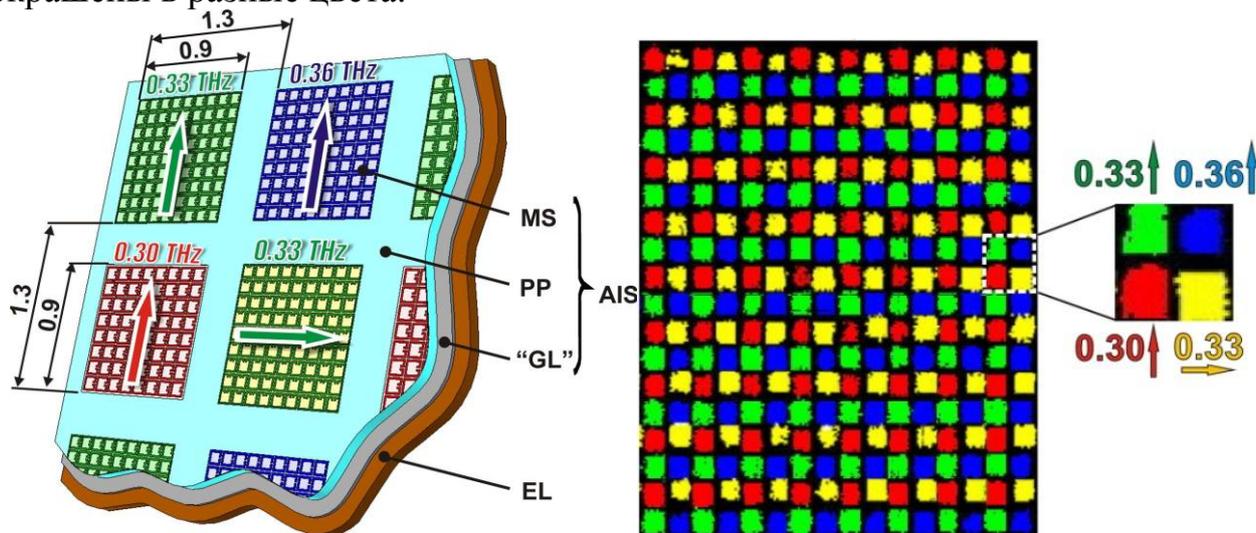


Рисунок 1 – схема многоспектрального конвертера (слева) и его тепловое изображение (права) при засветке конвертера ТГц излучением, содержащим частоты в диапазоне 0.3-0.4 ТГц с двумя взаимно перпендикулярными поляризациями. Пиксели с различной спектральной и поляризационной чувствительностью раскрашены в различные цвета.

Математическое моделирование процессов поглощения ММ-излучения, теплопроводности вдоль структуры конвертера и теплового излучения со стороны эмиссионного слоя показали, что эффективность конверсии мощности ММ-излучения в тепловое излучение составляет более 90% при толщине конвертера менее 10 мкм. Таким образом, на основе данного подхода могут быть созданы гиперспектральные детекторы миллиметрового и субмиллиметрового диапазона вплоть до компактных спектрографов, работающих в параллельном режиме, а так же, многоспектральные поляриметры, определяющие эллипс поляризации излучения на заданном наборе длин волн.

Литература

1. S. A. Kuznetsov, A. G. Paulish, A. V. Gelfand, P. A. Lazorskiy, V. N. Fedorinin, “Bolometric THz-to-IR converter for terahertz imaging,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 99, 023501(3 p) 2011.

2 S. A. Kuznetsov, A. G. Paulish, A. V. Gelfand, P. A. Lazorskiy, V. N. Fedorinin, “Matrix structure of metamaterial absorbers for multispectral terahertz imaging,” *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 122, pp.93-103, 2012.

3 N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, and W. J. Padilla. Perfect metamaterial absorber, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 207402 (4 pages), 2008.

Использование активно-пассивных радиометров миллиметрового диапазона для обнаружения скрытых объектов

Ивашов С.И., Бугаев А.С., Веретин В.С.

Лаборатория дистанционного зондирования МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
sivashov@rslab.ru

Последние достижения в области разработки оптоэлектроники и высокочастотных компонент и устройств позволили перейти к разработке и проектированию устройств миллиметрового и терагерцового диапазонов длин волн. Освоение нового поколения элементной базы позволило создать сканирующие устройства, которые предназначены для досмотра пассажиров в аэропортах. Не менее острой, как показали события последнего времени, является потребность досмотра пассажиров, которые используют общественный наземный транспорт (метро, автобусы, поезда и др.) Это объясняется тем обстоятельством, что проблема защиты авиационного транспорта от террористических атак в значительной степени считается решенной: за последние годы в результате принятых мер не было осуществлено сколь-нибудь значительных терактов на воздушном транспорте. Для досмотра пассажиров в аэропортах при прохождении ими досмотровых камер просят снять верхнюю одежду, которая препятствует распространению микроволнового излучения, а сама процедура досмотра может занимать достаточно много времени. Задача защиты наземного пассажирского транспорта является более сложной в связи с необходимостью досмотра людей в верхней одежде и при этом не создавать препятствий для перемещения большого потока людей. Одной из возможных схем является использование активно-пассивного радиометра. Он состоит из двух частей: пассивной (самого радиометра) и активной (генератора шума – «подсвета»). Следует отметить, что использование широкополосного шумового генератора в активно-пассивной системе является принципиальным, т.к. при применении монохроматического подсвета происходит когерентное сложение отраженного от объекта сигнала и сигнала, непосредственно распространяющегося по боковым лепесткам диаграммы направленности из антенны генератора шума в приемную антенну радиометра. Еще одним требованием, выдвигаемым к генератору шума, является совпадение рабочих диапазонов радиометра и подсвета. Это требование является вполне естественным, т.к. в противном случае работа генератора шума не окажет никакого влияния на регистрируемые радиометром изображения.

Для проверки возможности обнаружения металлических объектов, установленных внаброс на поверхности земли, был разработан экспериментальный радиометрический комплекс миллиметрового диапазона. Выбор диапазона был связан с тем, что в этом диапазоне при приемлемой апертуре антенны радиометра можно обеспечить достаточно высокий контраст объектов обнаружения, диаметр которых составлял около 30 см. Комплекс включал в себя: радиометр 8-мм диапазона длин волн, генератор

широкополосных шумовых сигналов того же диапазона и телевизионную камеру. Все эти устройства соосно были закреплены на механическом сканирующем устройстве, обеспечивающем сканирование в двух плоскостях - по углу места и азимуту. Тем самым обеспечивалась возможность просмотра участка местности с неподвижного носителя аппаратуры. Диаграмма направленности основного лепестка антенны радиометра составляла 1° , а для антенны генератора шумовых сигналов $\sim 10^\circ$. Относительное расположение антенн генератора и радиометра выбиралось таким образом, чтобы добиться минимального уровня прямого сигнала от генератора к радиометру. Телевизионная камера обеспечивала оператору возможность сравнения получаемых изображений в радиодиапазоне и в видимом спектре.

Режим работы аппаратуры обеспечивал одновременное получение двух радиометрических изображений: в пассивном режиме (с выключенным подсветом) и в активном режиме, когда генератор шума был включён. На переднем плане снимаемой местности на поверхности грунта в шахматном порядке в три ряда были выложены 9 круглых металлических объектов. Ближайший к радиометрическому комплексу объект находился на расстоянии 10 м, а дальний – 22 м. Объекты в правом ряду для увеличения контраста были установлены на подставках и наклонены в сторону радиометра. Параллельно полю с объектами, слева от него, в качестве репера была выложена металлическая полоса. На заднем плане располагались в центре снимка ажурная металлическая вышка, а в левом верхнем углу строение с плоской металлической крышей. Результаты съёмки местности в пассивном режиме и в режиме с подсветом приведены на рис. 1 и 2, соответственно. Градации яркости на этих рисунках выбраны так, что объектам с более низкой радиометрической температурой соответствуют более тёмные участки изображения. Так как металлические объекты в радиодиапазоне имеют коэффициент отражения близкий к 1, то, отражая излучение неба, радиояркость температуры которого ниже температуры земных покровов, они на радиометрическом квазиизображении выглядят более тёмными.

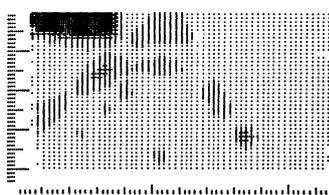


Рис. 1. Радиометрическое изображение местности в пассивном режиме.



Рис. 2. Радиометрическое изображение местности в режиме подсвета генератором шума.



Рис. 3. Результат совместной обработки изображений на рис. 1 и 2.

На рис. 1 отчётливо видны ближайшие к радиометру объекты, а также объекты правого ряда, контраст которых выше. Виден также репер слева от

поля с объектами, а на заднем плане в левом верхнем углу отчётливо наблюдается металлическая крыша строения и виден силуэт вышки. Приведённое изображение показывает, что при заданных параметрах радиометрического датчика в пассивном режиме контраст металлических объектов, установленных параллельно поверхности земли, достаточен для их обнаружения только на расстоянии до 15-20 м. На больших расстояниях их контраст находится на уровне естественных колебаний радиояркостной температуры подстилающей поверхности. При включённом шумовом генераторе изображение качественно изменяется, см. рис. 2. В этом случае контраст металлических объектов по отношению к фону зависит не только от их размеров, но и определяется формой наблюдаемых объектов. Так объекты плоской формы, зеркально отражающие излучение подсвета с высокой радиояркостной температурой, по-прежнему видны на изображении, как объекты с низкой радиояркостной температурой. Это объясняется тем, что в направлении антенны радиометра отражается только излучение неба. Такими объектами на изображении являются крыша строения и металлический репер. Объекты же сложной формы, представляя собой набор «блестящих точек», отражают в направлении антенны радиометра излучение подсвета. Такие объекты на изображении поменяли контраст по отношению к фону. К ним относятся объекты, подлежащие обнаружению и ажурная вышка на заднем плане. Вместе с тем при использовании подсвета степень неоднородности фона возросла, что также затрудняет обнаружение.

Для селекции объектов сложной формы, какими и являются используемые объекты, был предложен алгоритм, работающий по схеме совпадений и выделяющий на изображениях на рис. 1 и 2 только те объекты, которые меняют свой контраст по отношению к фону при включении подсвета. Результат совместной обработки изображений на рис. 1 и 2 по описанному алгоритму приведён на рис. 3. Анализ данного изображения показывает, что из выложенных 9 объектов обнаружены 7, а также видна вышка, как объект сложной формы. Все остальные предметы исчезли с изображения.

В заключение отметим, что предложенный метод обнаружения объектов, имеющих сложную форму также можно использовать для других задач, например, он может быть использован для обнаружения оружия и взрывчатых веществ под одеждой человека. Для этого в режиме непрерывного просмотра стоящих илидвигающихся людей подсвет должен работать в режиме стробоскопа. Таким образом, при выключенном генераторе шума и при заданном положении антенн радиометрического комплекса будет происходить регистрация элемента пассивного радиометрического изображения, при включённом генераторе – активного. При соответствующем выборе частоты переключения режимов работы генератора шума можно добиться полного совмещения обоих изображений в процессе их последующей обработки. По сравнению с существующими пассивными радиометрическими комплексами использование шумового подсвета дает больше информации, т.к. в нем используется и информация, получаемая в пассивном режиме.

Авторы выражают благодарность О.Н. Линникову и Б.А. Юфрякову за выполнение экспериментальных работ. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

Именной указатель

А		Вишневский Г.И.	54
Алексеев А.А.	60,100,121,122	Вороков А.В.	63
Аржанников А.В.	142	Воропай Е.С.	32
Архипов С.А.	25,43,44,83,85,97,132,134	Выдревич М.Г.	5
Асмус В.В.	19		
Астахова Е.И.	100	Г	
Ахметов Р.Н.	23	Гасилина О.В.	70
Ахметьянов В.Р.	41	Гасич Г.В.	132,134,135
		Головин Ю.М.	83,85
Б		Голяк И.С.	90
Бакланов А.И.	48,49	Горбунов Г.Г.	73
Баронкин А.С.	95	Горелик В.С.	92
Батова С.С.	140	Горюнова В.Н.	119
Беликов Ю.Е.	117	Голубева Е.И.	137
Беляковский В.И.	62	Григорьев А.А.	75
Болмосов И.В.	83,85	Григорьев А.Н.	128,130
Бондур В.Г.	14	Григорьева О.В.	100,122,125
Боритко С.В.	64	Груздев В.Н.	58,60
Боровский А.Н.	117	Гулис И.М.	32
Бровкина О.В.	122		
Бугаев А.С.	145	Д	
Бутяйкин Н.А.	132,134	Дмитриев Е.В.	102
В		Е	
Вагин В.А.	86	Еланский Н.Ф.	117
Васильев Н.С.	80	Епихин В.М.	35
Везенов В.И.	23	Еремеев В.В.	23
Веретин В.С.	145	Ефимов И.Н.	75

Ж		Костюкевич А.Г.	32
Жадковский А.В.	100	Котов М.Н.	62
Жарков А.В.	86	Кравченко С.О.	43,44
Жуков Д.В.	100.122.125	Крадецкий В.В.	86
З		Краснушкин А.В.	137
Забиякин А.С.	49	Красовский А.С.	4
Завелевич Ф.С.	83,85,	Красавцев В.М.	60
Заичко В.А.	10	Кудрявцев С.В.	100
Зимин А.М.	67	Кузнецов С.А.	142
Зимин М.В.	137	Купреев А.Г.	32
Зубко А.В.	97	Курова О.П.	54
		Кушнарев К.Г.	69,85
И		Л	
Ивашов С.И.	145	Лалакин А.В.	97
К		Ли А.В.	43,44,132,134,136
Каменцев В.П.	102	Линько В.М.	43,44,132,134,135
Карпухина О.А.	113,115	Литвинова А.О.	95
Карфидов А.О.	88	Локштанов С.Е.	117
Кияченко Ю.Ф.	35	Лузганова М.Ю.	132,134,135,136
Климович Т.В.	62	Лукашевич Е.Л.	113
Клюшников М.В.	48	Ляхов А.Ю.	25
Козлов Д.А.	83,85	М	
Козлов И.А.	83,85	Мазур Л.И.	35
Козодеров В.В.	102	Мазур М.М.	35
Кондранин Т.В.	102	Макаренков А.А.	112
Королёв П.А.	88	Мащицкий Ю.П.	83

Миронов А.И.	88	Постыляков О.В.	117
Митин И.В.	117	Пустовойт В.И.	12,39
Михеева А.И.	137		
Молчанов А.С.	21	Р	
Монахов Д.О.	83,85,96	Ризванов А.А.	63
Морозов А.Н.	77,80,90	Романовский А.С.	83,85,86,95
Морозов С.А.	43,44	Рублев А.Н.	19
Морозова С.П.	132,134		
Москвитин А.Э.	112	С	
Мочалов В.Ф.	122	Савицкий А.М.	48
Мошкин Б.Е.	86	Сальникова М.А.	43
Н		Самохина И.А.	46
Николенко А.А.	41,104	Седельников В.П.	113
Никулин А.Г.	83	Семин В.А.	49
		Серёгина А.С.	49
О	107,109	Сикорский Д.А.	62
Остриков В.Н.		Смирнов А.В.	70
		Сокольский М.Н.	48
П		Стариченкова В.Д.	46
Пальцев Л.Л.	35	Стратилатов Н.Р.	23
Панфилов А.С.	132,134	Страхов П.В.	104
Паулиш А.Г.	142	Судденок Ю.А.	35
Перчик А.В.	64	Т	
Пирогов Ю.А.	139,140	Табачкова К.И.	39
Платанов С.Ю.	95	Тарасов А.П.	25
Плахотников О.В.	107,109	Терентьева В.В.	41,100,125
Пожар В.Э.	12,39	Тишкин Р.В.	111
Позвонков А.А.	75	Тройнов В.И.	67

Тышкунов Н.В. 85

Тугубалина О.В. 137

У

Успенский А.Б. 19

Ушаков Н.Н. 96

Ф

Федоринин В.Н. 142

Фуфурин И.Л. 77

Х

Хайлов М.Н. 10

Хорохорин А.И. 86

Хохлов С.А. 95

Ц

Целиков В.А. 83,85

Ч

Чабан Л.Н. 104

Чапурский Л.И. 100,125

Четвергов М.В. 54

Чиванов А.Н. 46

Чиков К.Н. 60

Чуличков А.И. 140

Ш

Шилин Б.В. 58,60,121

Шилов М.А. 86

Шлыгин П.Е. 75

Шорин В.Н. 35

Шурыгин Б.М. 104

Ю

Юдаков А.А. 23,111