
К 110-летию СПбГУ ИТМО

УДК 528.8 (15)

А. В. Демин, А. В. Денисов, А. В. Летуновский

ОПТИКО-ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

На основе данных из общедоступных источников рассматривается тенденция развития основных направлений оптико-цифровых систем и комплексов дистанционного зондирования Земли из космоса.

Ключевые слова: оптико-цифровые системы и комплексы космического назначения, дистанционное зондирование Земли, астрометрия, линейное разрешение на местности, космический аппарат.

Повышение эффективности управления научно-техническими и технологическими процессами, связанными с разнообразными направлениями исследований в интересах народного хозяйства и обороноспособности страны, а также изучения ближнего и дальнего космоса, требует использования дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и возможностей такого направления исследований, как астрометрия. Определим основные направления разработок для решения практических задач, стоящих перед оптико-цифровыми системами и комплексами (ОЦСиК), устанавливаемыми на борт космического аппарата массой 100—2000 кг [1—23].

Дистанционное зондирование Земли:

- линейное разрешение на местности не хуже 0,5 м для панхроматического канала и менее 3 м — для мультиспектрального;
- полоса захвата порядка 20 км;
- отношение сигнал/шум не хуже 150;
- функция передачи модуляции на зачетной частоте не хуже 0,2.

Астрометрия:

- создание высокоточного (погрешность — не хуже $25 \cdot 10^{-6}$ секунд дуги) каталога положений (точность положений и собственных движений — не хуже $1 \cdot 10^{-3}$ секунды дуги; точность определения параллакса — порядка $4 \cdot 10^{-5}$ секунд дуги для звезд, величина которых составляет 16 m; точность фотометрии — 0,01—0,10 м для длины волны 0,2—10 мкм, число спектральных полос 10—16) и собственных движений небесных объектов — до 18 m;

- создание каталога спектральных энергетических распределений ($R \sim 1/2000$) звезд до 12 m (выборочно — до 16—18 m) и лучевых скоростей всех звезд до 18—19 m в 4—6 независимых интервалах спектра.

Рассмотрим первое из указанных направлений. Использование дистанционного зондирования Земли в оптическом диапазоне длин волн позволяет получать информацию как о географических и геофизических ее параметрах, так и о техногенных процессах, происходящих на поверхности Земли, что повышает ценность этой информации. ДЗЗ в зависимости от задач, для решения которых оно предназначено, осуществляется методами маршрутной,

объектовой, стереоскопической, статической, динамической, топографической и спектрометрической съемки. ДЗЗ в оптическом диапазоне осуществляется с помощью ОЦСиК, устанавливаемых на борт космических аппаратов (КА). Развитие космических ОЦСиК идет по пути создания пакета схемотехнических решений и информационных технологий, позволяющих разрабатывать и создавать комплексы с уникальным сочетанием информационных, энергетических, точностных и массогабаритных параметров.

В соответствии с концепцией построения нового поколения комплексов космического базирования различного назначения предполагается создание ОЦСиК, обеспечивающих:

— мониторинг поверхности Земли с высоким пространственным и энергетическим разрешением;

— получение информации для описания поверхности Земли и ее топографии с высокой точностью;

— решение задач астрометрии с высокой точностью;

— проведение астрофизических исследований (включая спектрометрию) с высокой точностью и достоверностью.

Также для дальнейших исследований необходимы:

— учет возможных направлений совершенствования информационных технологий в наземном сегменте с целью увеличения его производительности для удовлетворения запросов потребителей;

— совершенствование технологии и методологии космических исследований с целью повышения надежности и достоверности обнаружения самых различных подвижных и неподвижных объектов на сложном фоне.

Новые конструкторско-технологические решения для создания перспективных ОЦСиК должны быть основаны на следующих направлениях:

— разработка высокоапертурных оптических систем с возможностью изменения конфигурации в зависимости от требуемого пространственного и энергетического разрешения;

— создание мультимодульных оптических систем с активным управлением формой волнового фронта;

— уменьшение массогабаритных характеристик за счет применения новых конструктивных материалов, технологий производства, радиоэлектронных элементов и фотоприемных устройств.

Бурное развитие ОЦСиК для ДЗЗ космического базирования в конце XX в. привело к тому, что появились системы с линейным разрешением на поверхности (проекция пиксела на поверхность Земли) порядка 1—2 м при диаметре входного зрачка объектива порядка 0,35—0,7 мм и массе КА 250—1000 кг. К такому классу систем можно отнести: IKONOS-2 (США, 1999 г.); QuickBird-2 (США, 2001 г.); OrbView-3 (США, 2002 г.); Spot-5 (Франция, 2002 г.); Eros-A (Израиль, 2000 г.); Cartosat-1 (Индия, 2005 г.); Kopsat-1 (Корея, 1999 г.); Formosat-RocSat-2 (Тайвань, 2004 г.).

Дальнейшее развитие рынка коммерческой видовой продукции, связанное с возникновением спроса на высококачественную информацию субметрового разрешения, которая необходима для разработки высокоточных детальных карт и цифровых моделей рельефа Земли, обеспечило толчок развитию технических средств. К концу первого десятилетия XXI в. появились предложения от американских компаний-операторов Digital Globe и Geo Eye вывести на орбиту порядка 700 км аппарат двойного назначения GeoEye-1 (2008 г.) и WorldView-II (2009 г.) [20].

На этих КА устанавливается ОЦСиК с линейным разрешением на местности (ЛРМ) порядка 0,5 м, видеоинформацию от которого предполагается использовать как для выполнения коммерческих заказов, так и в интересах видовой космической разведки. При определенных условиях эти КА могут обеспечивать получение видеоинформации с ЛРМ до 0,25 м и с высо-

кой оперативностью передавать ее потребителю. Однако законодательство США накладывает ограничения на поставку видовых материалов для заказчиков за пределами США — информация должна поставляться с разрешением до 0,5 м и с задержкой по времени не менее чем на 24 часа. Эти обстоятельства создают дополнительный стимул для развития подобных космических ОЦСиК для ДЗЗ в других странах, в том числе и в России.

В указанных выше суперспутниках США реализована одна из основных тенденций мирового развития КА ДЗЗ — создание тяжелых КА (массой более 2000 кг), на которых размещаются крупногабаритные приборы с диаметром входного зрачка порядка 1,0—1,5 м и многоэлементные мелкоструктурные фотоприемные матрицы (ФПЗС) с размером пиксела порядка 6—8 мкм, что позволяет достичь сверхвысокого разрешения.

Суперспутники GeoEye-1 и WorldView-II обеспечивают просмотр подстилающей поверхности Земли с проекцией пиксела в панхроматическом канале 0,41 и 0,46 м соответственно, первый в полосе захвата 15,2 км, а второй — 16,4 м, с высоты орбиты 684 и 770 км соответственно. При этом масса первого КА составляет 1955, второго — 2800 кг, диаметр входного зрачка телескопа — 1,1 м для обоих КА, эффективная длина строки многоэлементного приемника — порядка 36 000 пикселей. Наблюдение производится одновременно в панхроматическом (ПХ) и мультиспектральном (МС) спектральных диапазонах. Число спектральных диапазонов МС канала в первом КА — 4, а во втором — 8.

Как показывает анализ развития КА ДЗЗ, для того чтобы в дальнейшем перейти к многократному расширению возможностей применения видовой продукции, необходимо совершенствовать суперспутники двойного назначения субметрового разрешения, повышая информативность видеоматериалов, точность координатной привязки, увеличивая производительность съемки и оперативность доставки видеоматериалов потребителю.

В таблице приведены данные по ОЦСиК, функционирующих в настоящее время на космических орбитах (здесь D — диаметр входного зрачка, F — фокусное расстояние, α — угол поля зрения).

КА для ДЗЗ состоит из двух частей: ОЦСиК и многофункционального контейнерного блока, обеспечивающего обработку и передачу данных, тепловой контроль, выработку и распределение энергии космическим аппаратом.

На рис. 1 представлена орбитальная конфигурация КА серии Pleiadas [19], а на рис. 2 приведено схемно-конструктивное решение ОЦСиК для КА серии Pleiadas (объектив расположен в корпусе из углепластика), которое является фактически обобщенным для всех КА, решающих задачу ДЗЗ.

Основными компонентами ОЦСиК являются объектив и система приема и преобразования информации (СПИИ), в состав которой входят ФПЗС с электронными компонентами и блок преобразования и сжатия информации. В КА серии Pleiadas для сжатия информации применяется вейвлет-алгоритм, который позволяет для видеоинформации порядка 4 Гбит/с реализовать семикратную компрессию вместо стандартной четырехкратной. Звездный датчик и волоконно-оптический гироскоп обеспечивают совместно с двигательной установкой КА требуемое положение ОЦСиК на орбите по отношению к поверхности Земли.

ФПЗС позволяет формировать информацию о поверхности Земли в панхроматическом режиме съемки 0,4—0,9 мкм и в мультиспектральном. Мультиспектральные (или спектрональные) изображения представляются в виде сигналов отдельных спектральных каналов, которые в дальнейшем могут использоваться для получения изображений. В натуральных или искусственных цветах поочередный синтез отдельных сигналов позволяет решать разнообразные тематические задачи, а также помогает при дешифрировании малоконтрастных изображений.

Система	Страна	Масса КА, кг	Масса ОЦСиК, кг	Высота орбиты, км	Оптическая система	Параметры			Спектральный диапазон, мкм	Угловой размер пиксела, мкрад	Полоса захвата, км	Проекция пиксела на Землю, м
						D, м	F, м	α, \dots°				
KH-12 (2000 г.)	США	12000	2800	350—550	Ричи—Кретьена	2,3	40	0,6	0,5—0,8	0,3	4	0,144
						0,7	10	1				
IKONOS-2 (1999 г.)	США	700	170	683	Корш	0,3	3,5 8	1,5 1,6	0,45—0,9 0,45—0,52 0,52—0,6 0,63—0,69 0,76—0,9	0,3	4	0,144
EROS-AI (2000)	Израиль	250	70	480	Ричи—Кретьена	0,16	1,082	4	0,45—0,52 0,63—0,69 0,76—0,9	1,36	22	0,8 3,2
QUICK-BIRD (2001 г.)	США	980	300	450	Зеркальная внеосевая	0,16	1,082	4	0,49—0,69 0,43—0,47 0,61—0,68 0,68—0,89 1,58—1,75	4,6	20	0,7 2,8
SPOT-5 (2002 г.)	Франция	3000	955,5	822	Схема Шмидта	0,16	1,082	4	0,49—0,69 0,43—0,47 0,61—0,68 0,68—0,89 1,58—1,75	4,6	20	0,7 2,8
Pleiadas (2007 г.)	Франция	980	300	695	Корш	0,65	12,9	4	0,49—0,69 0,43—0,47 0,61—0,68 0,68—0,89	1 4	20	0,7 2,8
WorldView 2 (2009 г.)	США	2800	<1000	759—776	Трехзеркальная	1,1	13,3	1,28	0,4—0,8 0,45—0,51 0,51—0,58 0,63—0,69 0,77—0,895	0,6	16,4	0,46 1,85

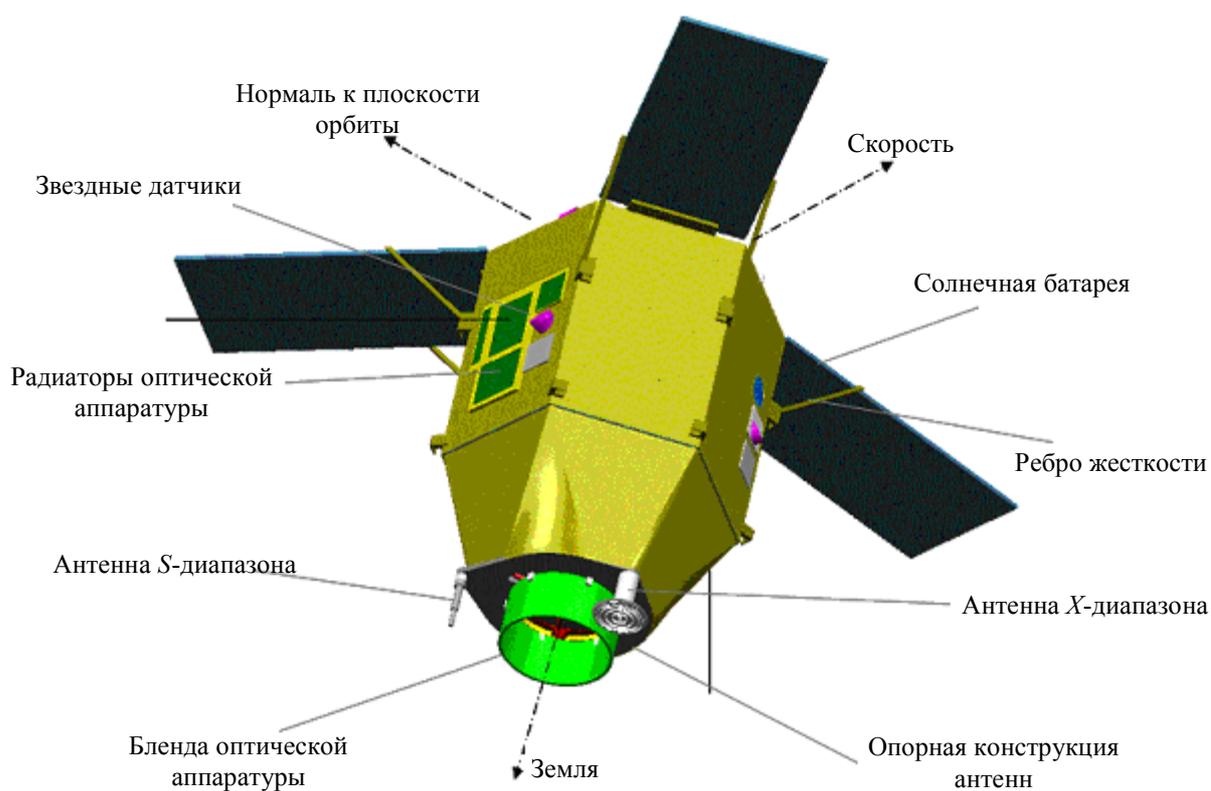


Рис. 1

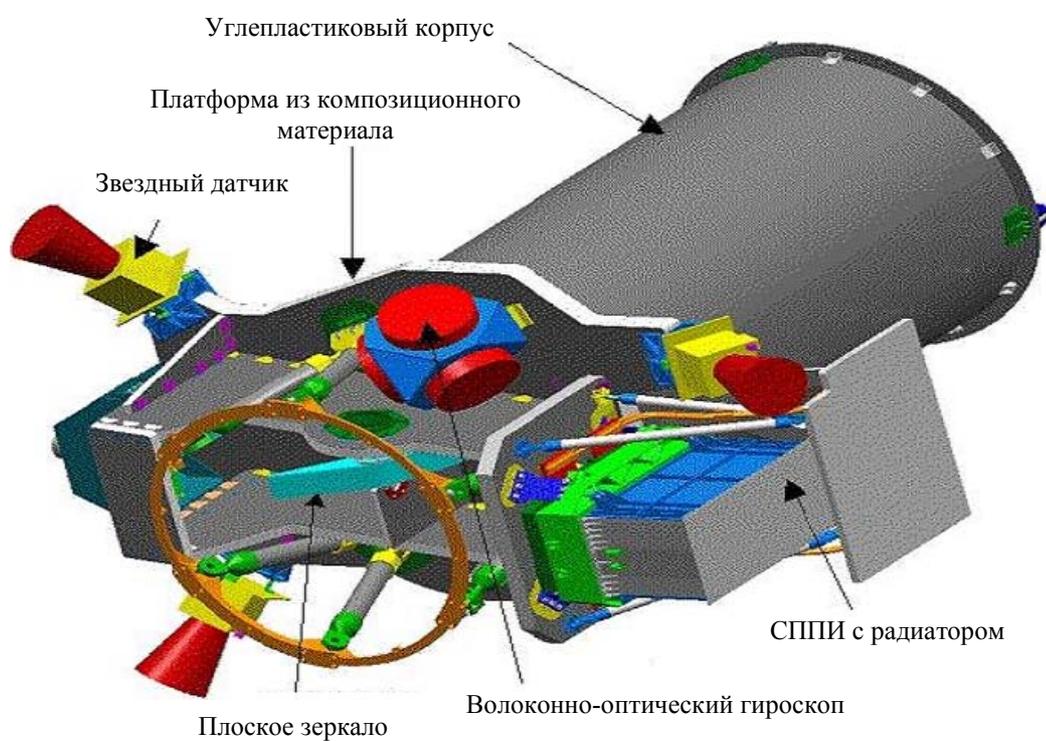


Рис. 2

Емкость запоминающего устройства ОЦСиК достигает 600 Гб и выше; расчетная скорость передачи данных — порядка 600 Мбит/с. Максимальная скорость ввода видеоданных в запоминающее устройство — 1,5 Гбит/с.

Высокое качество изображения в ОЦСиК является обязательным требованием. Поэтому модуляционная передаточная функция панхроматического канала должна быть не хуже 0,1 на рабочей пространственной частоте, а отношение сигнал/шум при номинальной энергетической яркости Земли должно быть порядка 100. Точность определения местоположения на изображении без использования наземных данных должна достигать 20 м, а при использовании опорных знаков на Земле, отстоящих друг от друга примерно на 80 км — 0,5 м.

На следующем этапе данные кодируются по схеме решетчатого кода в модуляторах типа 8-PSK, которые имеют собственные твердотельные усилители мощности. Затем данные сжимаются и передаются на Землю с помощью антенны X-диапазона. Она установлена на двухосном универсальном карданном подвесе, что гарантирует передачу данных во время движения. В период регистрации изображения этот механизм не используется, чтобы минимизировать динамические искажения. Специальная наводящая антенна ориентирует передающую антенну при движении спутника так, чтобы наземная принимающая станция всегда оставалась в зоне ее действия. Таким образом, передача данных из космоса происходит в условиях полной видимости наземной принимающей станции.

Основные оптические схемы, применяемые в космических ОЦСиК, приведены на рис. 3—6 (рис. 3 — схема Ричи—Кретьена с корректором полевых aberrаций, рис. 4 — зеркальная оптическая система — схема Корша, рис. 5 — оптическая схема с двухзеркальным корректором полевых aberrаций — четырехзеркальная схема, рис. 6 — трехзеркальная внеосевая схема — трехзеркальный триплет Кука).

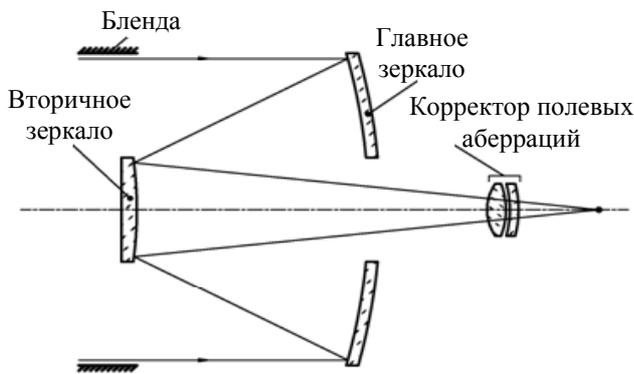


Рис. 3

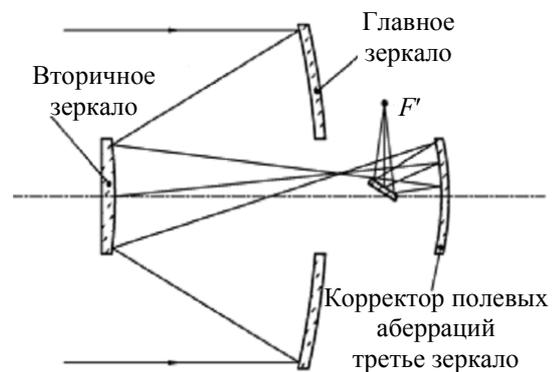


Рис. 4

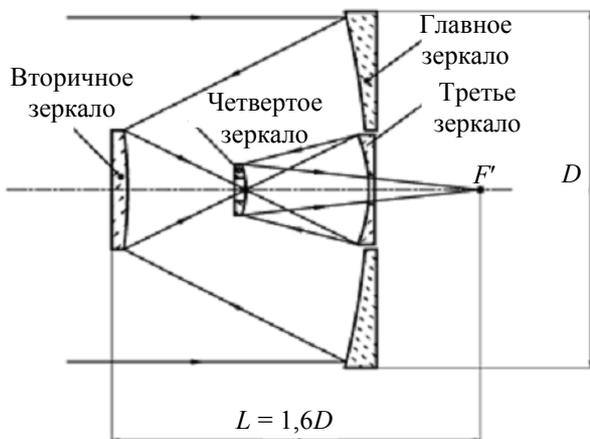


Рис. 5

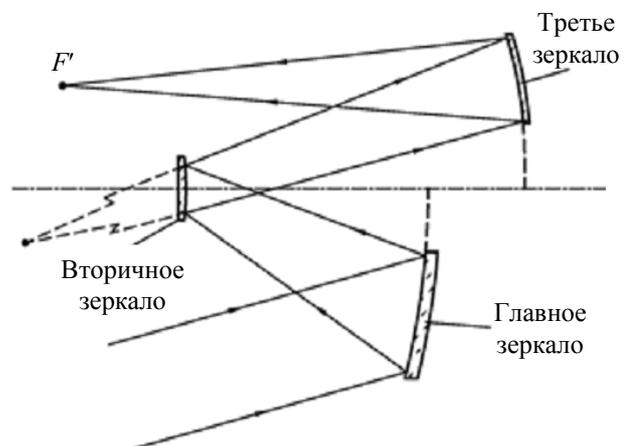


Рис. 6

Основной задачей астрометрических исследований помимо создания каталога положений и собственных движений небесных объектов на микросекундном уровне точности являются:

- определение кратности звезд;
- определение орбитальных движений в двойных и кратных системах;
- поиск невидимых спутников у звезд;
- исследование динамики и кинематики звездных скоплений;
- расчет тригонометрических параллаксов (для нахождения расстояний до звезд);
- уточнение шкалы межзвездных расстояний;
- исследование воздействия нестационарного гравитационного поля галактики на координатно-временные измерения;
- уточнение размеров и возраста Вселенной.

Эти задачи решаются, например, с помощью оптического звездного интерферометра, размещаемого на искусственном спутнике.

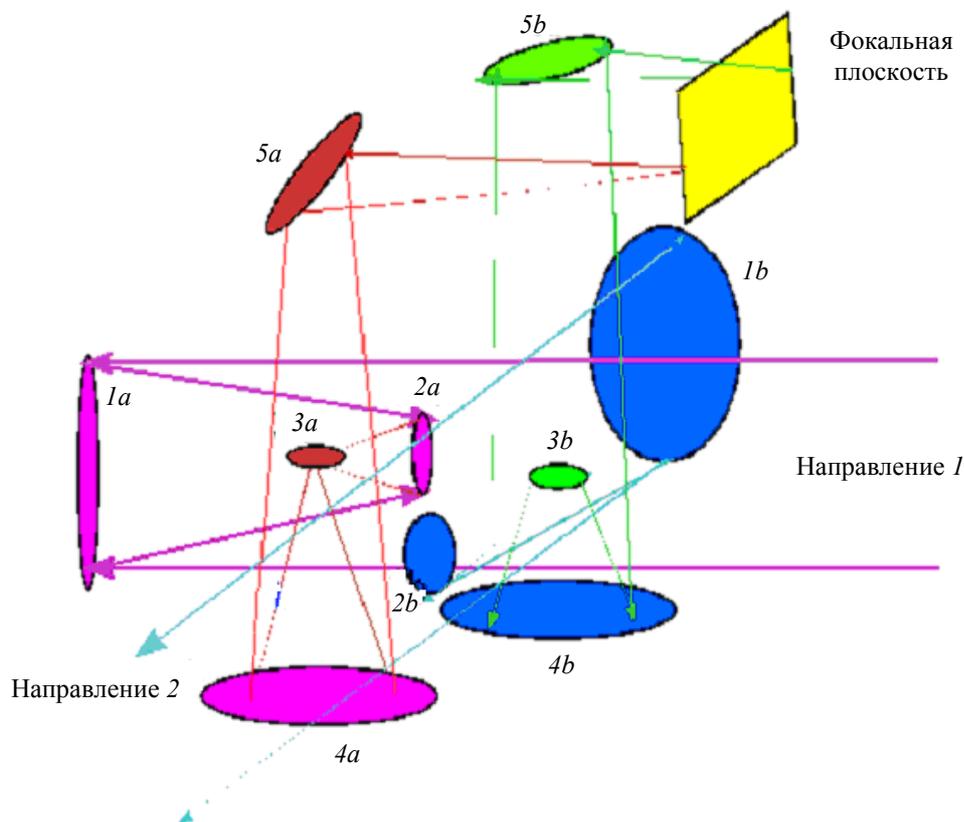


Рис. 7

На рис. 7 приведена оптическая схема звездного интерферометра (выполненного в рамках проекта Gaia), обеспечивающая положение в фокальной плоскости двух оптических излучений, проходящих в направлениях 1 и 2, каждое через свою оптическую систему, состоящую из зеркал 1а, 2а, 3а, 4а, 5а и 1б, 2б, 3б, 4б, 5б соответственно. В фокальной плоскости формируется интерференционная картина взаимодействия двух оптических излучений. Этот звездный интерферометр имеет следующие параметры и характеристики [21]:

- диаметр главных зеркал телескопов интерферометра — 1—1,5 м;
- фокусное расстояние объектива телескопа — порядка 30—45 м;
- поле зрения телескопа 1—1,5°;
- габариты ФПЗС — 0,5×0,5 м;

— применяемый в интерферометре ФПЗС с обратной засветкой содержит 40×40 мозаику матриц 1000×1000 пикселей каждая. Размер пикселя матриц 12 мкм, что соответствует угловому разрешению телескопа $0,08''$;

— фиксируемый угловой размер звезды $0,3—0,4''$ на длине волны 800 нм;

— случайная ошибка измерения положения звезды 14-й звездной величины на одной матрице ПЗС с угловым размером $0,003''$.

Таким образом, анализ состояния и тенденций развития двух основных направлений ОЦСиК позволяет сделать следующие выводы.

1. Современное состояние зарубежных систем ДЗЗ и перспективы их развития свидетельствуют о том, что в соответствии с большим кругом целевых задач, решаемых в интересах народного хозяйства и обороны, имеется широкая номенклатура космических аппаратов для ДЗЗ и астрометрии. Например, по предельному разрешению на местности, обеспечиваемому в ПХ-диапазоне, можно выделить четыре основных направления развития ОЦСиК для ДЗЗ: системы сверхвысокого разрешения — $0,2—0,5$; высокого — $0,5—1,0$; среднего $2—3$; малого — $10—20$ м.

2. С целью повышения информационных, энергетических, точностных и массогабаритных параметров ОЦСиК для космической съемки и астрометрии следует решить следующие основные задачи научно-технического и технологического характера:

— создание космических телескопов с апертурой главного зеркала $1—1,5$ м и выше. В частности, одним из путей создания высокоапертурных телескопов с диаметром главного зеркала порядка 2,5 м является отработка технологии изготовления и контроля составных зеркал на орбите, что позволяет существенно сократить вес телескопа [3, 10];

— разработка технологии композиционных материалов для космических систем;

— разработка приводов нового поколения, в частности пьезоприводов;

— создание крупноформатных ФПЗС с размером пикселя до $6—9$ мкм, работающих в режимах временной задержки и накопления и временной задержки и интегрирования;

— создание цифровых быстродействующих микросхем для обработки информации на борту КА (сжатие, кодирование);

— создание запоминающих устройств большой емкости (до 10^{13} бит);

— создание космической радиолинии со скоростью передачи информации от 700 Мбит/с и выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адров В. Н., Карионов Ю. И., Титаров П. С., Чекурин А. Д. Критерии выбора данных ДЗЗ для топографического картографирования. М., 2004.
2. Белецкий В. С. Очерки о движении космических тел. М.: Наука, 1977.
3. Васильев В. Н., Демин А. В., Гоголев Ю. А., Олейников Л. Ш. Оптико-электронные комплексы космического базирования // Тр. третьей воен.-науч. конф. космических войск. СПб, 2007. С. 127—133.
4. Васильев В. Н., Демин А. В., Гоголев Ю. А., Никифоров В. О. Оптико-электронные комплексы космического базирования — перспективы развития // Тез. докл. междунар. науч.-технич. конф. „Особенности развития космической отрасли России и перспективы ее дальнейшей интеграции в систему международных экономических связей“. СПб, 2007. С. 163—165.
5. Гарбук С. В., Гершензон В. Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. М.: А и Б, 1997.
6. Гречищев А. В., Лихачев Ю. А. Космические системы дистанционного зондирования Земли // Ежегодный обзор. Вып. 4. М.: ГИС-Ассоциация, 1999. С. 83—92.
7. Данилов В. А., Демин А. В., Никифоров В. О., Савицкий А. М., Сокольский М. Н. Многоспектральные оптико-электронные системы для микроспутников // Мат. науч.-технич. конф. „Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли“. М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2008. С. 34—38.

8. Данилов В. А., Демин А. В., Никифоров В. О., Савицкий А. М., Сокольский М. Н. Оптико-электронные комплексы для МКА // Там же. С. 65—68.
9. Демин А. В., Канаев И. И., Серегин А. Г., Смирнов А. П. Сопряжение звездного интерферометра Физо с обзорным изображающим телескопом // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 1. С. 48—52.
10. Демин А. В., Умбиталиев А. А., Цыцулин А. К. Перспективы развития космических систем наблюдения с адаптивной оптикой // Тез. докл. междунар. науч.-технич. конф. „Особенности развития космической отрасли России и перспективы ее дальнейшей интеграции в систему международных экономических связей“. СПб, 2007. С. 166—169.
11. Демин А. В., Горбунов Г. Г., Никифоров В. О., Савицкий А. М., Скворцов Ю. С., Сокольский М. Н. Гиперспектральная аппаратура для дистанционного зондирования Земли // Оптич. журн. 2009. Т. 76, № 10. С. 75—82.
12. Изображения Земли из космоса: примеры применения. М.: СКАНЭКС, 2005.
13. Кучейко А. А. Новый спутник сверхдетального наблюдения // Новости космонавтики. 2009. Т. 19, № 12. С. 323.
14. Кучейко А. А. Космическое зондирование Земли: итоги 2008 // R&D. CNews. 2009.
15. Конечны Г. Тенденции цифрового картографирования. Ганновер, Германия, 2007.
16. Титаров П. С. Практические аспекты фотограмметрической обработки сканерных космических снимков высокого разрешения // Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. 2004. № 3—4.
17. Чернявский Г. М. Космические средства при мониторинге Земли // Земля и Вселенная. 2004. № 5. С. 3—12.
18. Черток Б. Е. Космонавтика сегодня и завтра // Военно-промышленное обозрение. Арсенал. 2009. № 3.
19. Европейская система дистанционного зондирования высокого разрешения „Плеяды“, 2006 [Электронный ресурс]: <<http://www.sovzond.ru/dzz/publications/541/3037.html>>.
20. Снимки GeoEye-1, 2009 [Электронный ресурс]: <<http://www.racurs.ru/,page=456>>.
21. Проект Gaia, 2009 [Электронный ресурс]: <http://www.safran.ru/article.php?id_article=621>.
22. Тр. III воен.-науч. конф. космических войск / Под ред. В. Е. Прохорович. СПб, 2007.
23. Fender J. Future Trends in Large Space Optics // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4013. P. 682—686.

Сведения об авторах

- Анатолий Владимирович Демин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информатики и прикладной математики;
E-mail: dav_60@mail.ru
- Андрей Васильевич Денисов** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информатики и прикладной математики;
E-mail: www.denisoff@mail.ru
- Александр Васильевич Летуновский** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информатики и прикладной математики

Рекомендована кафедрой
информатики и прикладной
математики

Поступила в редакцию
25.12.09 г.