

УДК 681.7,534.4

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

© 2010 А.И. Бакланов

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

На основе анализа характеристик различных коммерческих КА ДЗЗ высокого разрешения, выведенных на орбиту в последнее десятилетие, предпринята попытка классификации систем наблюдения. Выделены однотипные группы спутников, показаны тенденции их развития и изменения основных параметров, а также взаимосвязь массовых характеристик КА с разрешением, точностными и информационными параметрами.

ДЗЗ, оптико-электронная аппаратура, КА ДЗЗ, дистанционное зондирование Земли

С конца 80-х годов прошлого века отмечается бурный рост и развитие космических оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли высокого разрешения. Этот рост обусловлен возросшими возможностями космических и информационных технологий, огромным прогрессом в оптике, микроэлектронике, материаловедении, а самое главное, подтвержден всё возрастающими потребностями в геокосмической информации различных государственных структур, коммерческих организаций и даже отдельных граждан. В XXI веке применение геопространственной информации, полученной космическими системами наблюдения, стало насущной необходимостью при решении и реализации самых разных задач, научных и социально-экономических проектов.

24 сентября 1999 года был выведен на орбиту первый коммерческий космический аппарат ДЗЗ высокого разрешения "IKONOS" (США), который открыл новую эпоху в области дистанционного зондирования Земли. Спутник предназначен для получения в режиме реального времени цифровых изображений земной поверхности с пространственным разрешением 1 метр в панхроматическом диапазоне и с разрешением 4 метра в мультиспектральных каналах. Для

широкого круга потребителей стали доступны данные с высоким пространственным разрешением, которые ранее использовались только в разведывательных целях.

Постоянное улучшение разрешающей способности является основной тенденцией развития систем наблюдения из космоса на протяжении всего периода их существования и развития. На графике (рис. 1),

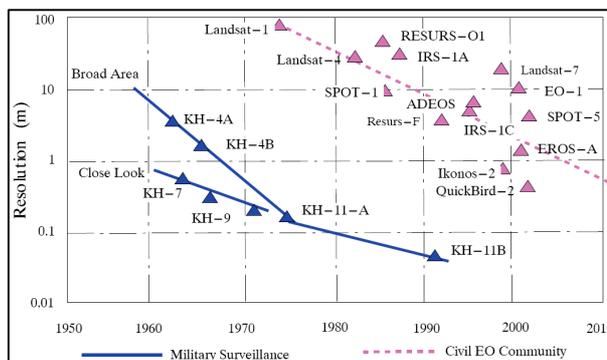


Рис.1 Тенденции изменения пространственного разрешения военных и гражданских спутников наблюдения Земли в период до 2002 г.

приведённом в [1], представлены некоторые данные по пространственному разрешению различных спутников наблюдения, запущенных и приступивших к работе в период до 2002 года. На графике по вертикали отложено разрешение в метрах, а по горизонтали - дата запуска. Отчётливая разница в

пространственном разрешении военных разведывательных спутников и гражданских КА ДЗЗ проявляется в наличии двух групп спутников и двух практически параллельных линий, обозначающих тенденцию улучшения разрешения. Разница в пространственном разрешении военных и гражданских КА достигала 1-2 порядков.

Первые спутники наблюдения Земли были фотографическими, т.е. изображение поверхности Земли фиксировалось на фотоплёнку автоматического фотоаппарата, а затем эта плёнка возвращалась на Землю в спускаемом аппарате или в специальных возвращаемых капсулах. Это в равной степени относится как к зарубежным, так и к отечественным спутникам наблюдения высокого разрешения.

Первый отечественный фотографический спутник "Зенит-2" с аппаратурой "Фтор-2" был разработан в ОКБ-1. А его первый успешный запуск был осуществлён 26 апреля 1962 года. Выведенный на орбиту спутник получил наименование "Космос-4" [2]. Дальнейшее продолжение работ по космической фоторазведке и их развитие связаны с Куйбышевским филиалом №3 ОКБ-1 и заводом "Прогресс", которые позже были преобразованы в самостоятельное специализированное КБ, ныне Ракетно-космический Центр "ЦСКБ-Прогресс" (г. Самара). Первый серийный "Зенит-2" ("Космос-9"), изготовленный в Куйбышеве (ныне Самара), стартовал уже 27 сентября 1962 г. Долгие годы главным, (а затем Генеральным) конструктором филиала №3 и ЦСКБ был Дмитрий Ильич Козлов, 90 летний юбилей которого отмечался в 2009 году. С 1963 года, начиная с КА «Зенит-4», первый запуск которого состоялся в 1963 г., под его руководством на конструктивно-аппаратурной базе "Зенитов" созданы 15 типов космических аппаратов: обзорного и детального наблюдения земной поверхности,

глобального картографирования Земли, а также для проведения различных научных исследований.

В 70-90е годы прошлого столетия были созданы и успешно эксплуатировались, обладающие более высокими характеристиками, спутники ДЗЗ нового поколения «Янтарь-2К», которые пришли на смену КА типа "Зенит", а также КА топографического назначения "Комета". Принципиально новым направлением было создание спутников "Янтарь-КС" и "Янтарь-4КС1", оснащённых оптико-электронной аппаратурой наблюдения земной поверхности с оперативной доставкой информации по радиоканалу на наземные пункты приёма.

В настоящее время оптико-электронные спутники наблюдения являются основными источниками разнообразной геопрограммной и спектральной информации о поверхности Земли. Кстати, первая телевизионная (оптико-электронная) система ДЗЗ, осуществляющая систематический обзор поверхности Земли в метеорологических целях, была установлена на американском космическом аппарате "Tiros-1", запущенном 1 апреля 1960 г. Первый отечественный ИСЗ аналогичного назначения "Космос-122" был выведен на орбиту 25 июня 1966 г. В области данных высокого и сверхвысокого разрешения в настоящее время основными поставщиками данных являются американские компании DigitalGlobe и GeoEye, которые эксплуатируют космические аппараты "QuickBird-2", "WorldView-1" и "IKONOS", "GeoEye-1", соответственно.

Как уже отмечалось выше, КА "IKONOS" стал первым коммерческим космическим аппаратом ДЗЗ. За ним последовали другие американские спутники: "QuickBird-2" (2001 г.) с разрешением 0,61 м. и "OrbView-3" (2003 г.) с разрешением 1 м. Долгое

время небольшую конкуренцию американским спутникам на рынке информации ДЗЗ высокого разрешения составляли только спутники, имеющие более низкое пространственное разрешение: "EROS-A" (Израиль, разрешение 1–1,8 м, 2000 г.), "SPOT-5" (Франция, разрешение до 2,5 м, 2002 г.), "Cartosat-1" (Индия, разрешение 2,5 м, 2005 г.), "Formosat-2" (Тайвань, разрешение 2 м, 2004г.). Однако с 2006 года ситуация начала резко изменяться.

В 2006-2007 году на орбиту выведены и приступили к работе новые космические аппараты с оптико-электронной аппаратурой высокого (метрового) разрешения — "EROS-B" (Израиль, до 0,7 м), "Ресурс-ДК1" (Россия, до 0,8 м), и "KompSat-2" (Корея, 1 м), "Cartosat-2" (Индия, 0,79 м). В конце 2007 года начал работу новый американский космический аппарат WorldView-1 (США, 0,45м, компания DigitalGlobe), который открыл новую эпоху коммерческих спутников сверхвысокого разрешения. Потребителям стала доступна панхроматическая цифровая информация с разрешением 0,5 метра. Запуск и ввод в эксплуатацию в 2008 году ещё одного КА ДЗЗ "GeoEye-1" (США, 0,41 м, компания GeoEye) с ещё лучшим разрешением только подтвердил обозначенное направление развития в область сверхвысокого разрешения. Этот аппарат помимо панхроматических изображений с разрешением 0,41 метра, обеспечивает одновременную съёмку и в 4-х мультиспектральных диапазонах с разрешением 1,64 метра.

Новые технологии получения данных ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения со спутников обладают большим потенциалом с точки зрения использования их высокой метрической точности в картографии. По данным зарубежных публикаций уже готов к запуску следующий американский космический аппарат наблюдения сверхвысокого разрешения "WorldView-2", который при практически одинаковых

с "WorldView-1" и "GeoEye-1" разрешении и полосе захвата будет осуществлять съёмку одновременно в панхроматическом и восьми узких спектральных диапазонах. С запуском этого аппарата будет практически сформирован новый "стандарт" в области мультиспектральной съёмки, ориентированный на восемь спектральных диапазонов (Рис. 2).

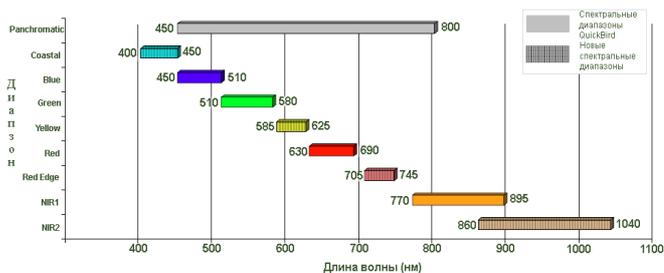


Рис.2 Спектральные диапазоны оптико-электронной аппаратуры КА сверхвысокого разрешения "WorldView-2"

Тенденции постоянного увеличения разрешающей способности (проекция пикселя на землю, или как обозначают в зарубежной литературе - GSD Ground Sample Distance) в коммерческих (гражданских) системах наблюдения отчётливо видны на рисунке 3. На рисунке выделено несколько групп космических аппаратов.

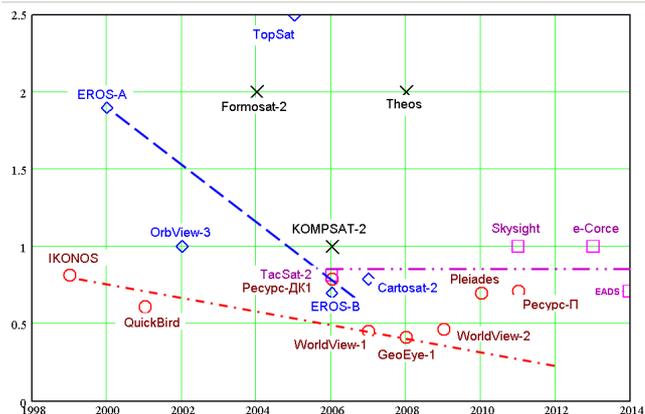


Рис. 3 Тенденции изменения пространственного разрешения спутников ДЗЗ высокого разрешения

Крестиками обозначены аппараты: "Formosat-2", "KOMPSAT-2", "Theos", созданные аэрокосмическими компаниями Европы по заказам

некоторых азиатских стран: Тайваня, Кореи, Тайланда. Аппараты создавались практически на одной платформе и потенциально могли бы нести полезную нагрузку с разрешением 1 м, тем более что апертура оптических систем на всех КА одинакова – 0,6 метра. Но по различным причинам, коммерческим и политическим, в том числе связанным с ограничениями на распространение информации высокого и сверхвысокого разрешения, только корейский аппарат имеет разрешение 1 м.

Вторая группа, которая обозначена ромбиками, это малые КА, осуществляющие съёмку в асинхронном режиме, с тангажным замедлением. Использование тангажного замедления, особенно с большим коэффициентом, существенно упрощает оптико-электронную камеру и позволяет достичь достаточного уровня сигнала и высокого разрешения за счет увеличения времени накопления. Так разрешение "EROS-A", составляет 1,9 м, "OrbView-3" – 1 метр, а разрешение "EROS-B" и "Cartosat-2" уже лучше метра и составляют 0,7 м и 0,8 м, соответственно. Из аппаратов этой группы только "OrbView-3" был способен осуществлять съёмку, как в панхроматическом, так и мультиспектральных диапазонах. Остальные спутники имеют только панхроматический канал. Инструменты перечисленных спутников имеют телескопы с диаметром апертуры от 0,35 м до 0,7 м. ("EROS-A" – 0,35; "EROS-B" – 0,5"; "OrbView-3" – 0,45"; "Cartosat-2" – 0,7). При этом камеры всех, кроме инструмента PIC-2 спутника "EROS-B", выполнены с использованием линейных ПЗС. В инструменте PIC-2 установлены матрицы ПЗС ВЗН.

Следующая группа (обозначенная кружками) – это высокопроизводительные спутники высокого и сверхвысокого разрешения, работающие в режиме заметания "push broom". Спутники имеют высокое разрешение и большую полосу захвата. Пространственное разрешение в этой группе составляет 0,8-0,41 м. Наивысшие

характеристики у новых американских спутников сверхвысокого разрешения: "WorldView-1", "GeoEye-1" и "WorldView-2". На сегодняшний день лучшее разрешение имеет КА "GeoEye-1" – 41 см. Конечно, нужно понимать, что на практике почти все аппараты этой группы, впрочем, как и аппараты второй группы, являются системами двойного назначения. Потенциал, заложенный в технических решениях этих КА наблюдения, позволяет реализовать ещё более высокие характеристики. Сообщается о проекте КА "GeoEye-2" с разрешением уже 25 см.

Вызывает интерес четвертая группа, обозначенная квадратиками. Это экспериментальные спутники и перспективные проекты с высокопроизводительной полезной нагрузкой на основе матриц ПЗС ВЗН. Начало этому классу аппаратов положил американский, в общем-то, военный, экспериментальный спутник "Tacsat-2" с телескопом диаметром 0,5 м. Спутник имеет разрешение 0,81 м, как в панхроматическом, так и в трёх дополнительных мультиспектральных (цветных) каналах и осуществляет съёмку в не очень большой полосе 5 км. При этом, несмотря на свои малые габариты, информационная производительность аппарата очень высока, так как он производит съёмку без какого-либо тангажного замедления. Дальнейшим развитием подобных технологий, сочетающих в себе решения на основе небольших платформ массой около 300 кг, не крупной широкопольной оптики с диаметром от 0,3 до 0,5 метров и использование ПЗС ВЗН, являются проекты "SkySight" с разрешением 1 м (полоса захвата 20 км), проект компании EADS 0,7 м и полосой захвата 4,9 км, а также проект "e-Corcor" специалистов французской компании Thales Alenia Space с разрешением 1 м и полосой захвата 60 км. Эти проекты малых КА массой 210 – 600 кг явно закладывают определённую альтернативную концепцию, отличную от создания больших, высокопроизводительных

космических аппаратов с предельными характеристиками по всем направлениям ("High end").

В чём же заключается эта альтернатива? Если ещё раз вернуться к анализу картины, отображенной на графике (рис.3), то наряду с тенденцией увеличения разрешения во всех основных группах нужно отметить потенциальную возможность реализовать высокое и даже сверхвысокое разрешение на разных платформах, при различных способах наблюдения, а самое главное при существенно отличающихся массах полезной нагрузки и космических аппаратов ДЗЗ в целом. Для осуществления анализа необходимо сравнить несколько основных параметров различных систем: разрешение, полосу захвата, информационную производительность, качество информации (динамический диапазон, отношение сигнал/шум), динамику и оперативность съёмки, возможность получения стереоизображений, больших площадок на одном витке, точность геопривязки данных и т.п. Важно также проследить тенденции их изменения, с тем, чтобы иметь прогноз на будущее.

График на рисунке 4 отражает достигнутое разрешение некоторых систем в зависимости от массы всего спутника вместе с полезной нагрузкой.

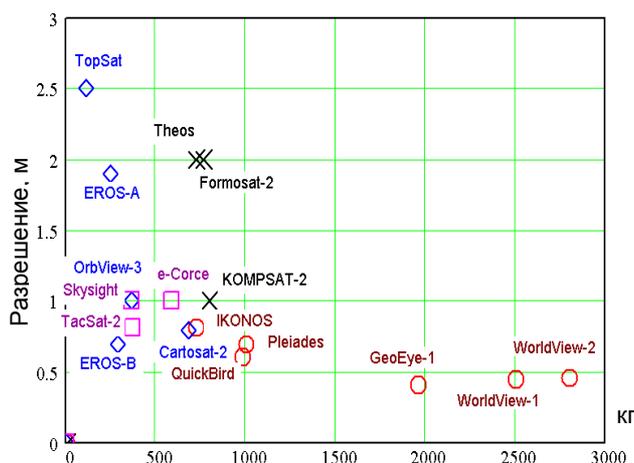


Рис. 4. Диаграмма разрешающей способности и массы КА ДЗЗ высокого разрешения

На диаграмме (рис. 4) четко выделяется группа спутников

сверхвысокого разрешения (обозначено кружками), у которых при улучшении разрешения с 1 м до 0,41 м, масса увеличилась с 700-800 кг до двух-трёх тонн. Перейдя в класс сверхвысокого разрешения, спутники ДЗЗ существенно потяжелели. Так, если масса КА "IKONOS" и "QuickBird-2" составляли 720 и 981 кг, соответственно, то масса КА "GeoEye-1" составляет 1955 кг, "WorldView-1" - 2500 кг, а "WorldView-2" – 2800 кг. Основными особенностями нового поколения американских КА ДЗЗ являются: использование крупногабаритной оптики, новых фотоприемников ПЗС, высокоточной скоростной трёхосной системы ориентации и стабилизации, а также радиолинии с большой пропускной способностью. В результате доработок, дооснащения запасами топлива перечисленные аппараты обеспечивают огромную ежедневную производительность (до 700 тыс. кв. км в сутки) при разрешении лучше 0,5 метра и наилучшей точности геопривязки данных без опорных точек.

Оптической системой на КА "GeoEye-1" и "WorldView-2" является модифицированный трёхзеркальный анастигматический телескоп Кассегрена с двумя дополнительными зеркалами для изгиба оптической оси, с апертурой диаметром 1,1 м, фокусным расстоянием 13,3 метра и полем зрения 1,28°. Столь большая апертура телескопа в коммерческих системах ДЗЗ используется впервые. На КА "IKONOS" и "QuickBird-2" диаметр телескопа составляли 0,7 и 0,6 метров соответственно. Увеличенный диаметр обеспечивает достижение максимального разрешения и качественного, контрастного изображения с большой высоты орбиты.

Высокая динамика в процессе съёмки спутниками "GeoEye-1", "WorldView-1" и "WorldView-2", высокая производительность, высочайшая точность геопривязки получаемых снимков – около 3 метров без использования опорных точек,

обеспечиваются применением новой системы трёхосной стабилизации и новой системы астроориентации на основе звёздных датчиков, которая ранее не использовалась на гражданских КА. Точность определения ориентации составляет 0,4" (3σ) при точности наведения 75" (3σ) и точности стабилизации 0,007 угл.сек./с. Угловая скорость перенацеливания достигает 4,5 градусов/с для "WorldView-1" и 3,5 градусов/с для "WorldView-2".

Высокая скорость разворотов, позволяет быстро перенацеливаться при осуществлении съёмки. Если спутнику "IKONOS" требовалось для перенацеливания на 300 км по поверхности Земли 18 секунд, а КА "QuickBird-2" вообще 62 с, то для этой же задачи КА "QuickBird-2" потребуется 10 секунд, "GeoEye-1" – 20 с, а "WorldView-2" только 9 секунд. Это позволяет почти в четыре раза поднять производительность и в 10 манёвренность по сравнению с "QuickBird-2". При этом появились возможности за счёт нескольких соседних сканов осуществлять съёмку больших площадок до 60x60 км на одном витке. За счет большой высоты орбиты возросла оперативность съёмки. Для "QuickBird-2" повторная съёмка с разрешением лучше 1 м была возможна через 2,5 суток, для "WorldView-1" этот параметр составляет 1,7 суток, а "WorldView-2" способен осуществить повторный снимок уже через 1,1 дня.

В связи с возросшими информационными возможностями нового поколения спутников наблюдения высокого разрешения до 2 Тбит увеличено бортовое запоминающее устройство, а скорость радиоканала для передачи информации на Землю составляет 800 Мбит/с.

Описанное направление развития систем ДЗЗ высокого разрешения не является единственным. Ряд разработчиков не стремится реализовать предельные характеристики своих систем сразу по всем направлениям (разрешение, производительность, точность), а

сосредотачивается только на одном или нескольких из этих параметров, реализуя необходимую для себя и коммерчески привлекательную для потребителей систему. Характерными примерами являются КА "EROS-B" и "Cartosat-2", в которых преимущество отдано только разрешающей способности (0,7 - 0,8 м) при небольшой полосе захвата 7-9,6 км. Производительность этих систем также невелика, тем более, что они используют при съёмке так называемый «асинхронный режим», т.е. тангажное замедление с большим коэффициентом от 2,5 для "Cartosat-2" до 4 на "EROS-B". Используемый на практике коэффициент тангажного замедления может быть гораздо больше. Так панхроматическая камера PIC (Panchromatic Imaging Camera) израильского спутника "EROS-A1" способна проводить съёмку при скоростях сканирования 30 – 750 строк/с со временами накопления от 18 до 1,3 мс, соответственно [5, 7]. Это соответствует фактическому сокращению скорости сканирования от 5 до 125 раз по сравнению с режимом без тангажного замедления/ Применение "асинхронного" режима существенно сокращает потоки внутренней видеоинформации и позволяет соответственно упростить и уменьшить объём и массу аппаратуры и спутника в целом (650 и 350 кг соответственно). Точность геопривязки данных этих аппаратов невысока и составляет около 100 м для "Cartosat-2".

Создаваемый уже почти на протяжении 10 лет ЕКА космический аппарат "Pleiades" массой около 1 т, с разрешением 0,7 м и полосой захвата 20 км, хотя и использует большое количество оригинальных решений, в том числе и оптическую "сшивку" длиной строки изображения, по совокупности своих характеристик будет, скорее всего, близок к КА "QuickBird-2", несколько превосходя его по динамике, точности и информационной производительности. Судя по опубликованным данным, "Pleiades" один из немногих аппаратов наблюдения с разрешением лучше 1

метра, который действительно может проводить съёмки очень протяжённых маршрутов в синхронном режиме заметания "push broom" без какого-либо тангажного замедления. До настоящего времени так могли работать только российский спутник ДЗЗ высокого разрешения "Ресурс-ДК1",

эксплуатируемый с 2006 года и КА "TasSat-2". Оптико-электронная аппаратура следующего поколения российских спутников "Ресурс-П" при существенном расширении полосы захвата до 38 км сохранит возможности высокопроизводительной съёмки длинных маршрутов до 2000 км

Среди новых заявленных проектов обращают на себя внимание два: это проект системы из 2-х спутников "SkySight-1" с разрешением 1-1,2 м (полоса захвата 20 км) и 2-х "SkySight-2" с разрешением 0,5-0,6 м, а также проект "e-Corice" с разрешением 1 м и полосой захвата 60 км. КА "SkySight" массой 366 кг имеет в своей основе технические наработки английских и канадских специалистов. В качестве полезной нагрузки используются оптико-электронные камеры "RalCam-4" и "RalCam-5" с диаметром оптики 0,48 м и 0,6 м соответственно. Проект "e-Corice" французских и итальянских специалистов предполагает создание группировки из 14 спутников, которая обеспечит ежемесячную съёмку всей поверхности Земли с разрешением 1 метр. Планируемая масса этих КА 590 кг. Для обеспечения большой полосы захвата каждый КА должен иметь по две одинаковых камеры с диаметром оптики 0,3 метра. Точность геопривязки в этих проектах будет на уровне КА "IKONOS" и "QuickBird-2", а высокая производительность достигается за счет большой численности КА в группировке. В системах типа "e-Corice" или аналогичном проекте компании EADS спутники вообще не имеют систем для обеспечения перенацеливания, а

осуществляют съёмку только в надир. Непрерывность покрытия при этом обеспечивается за счет баллистического построения, когда зона покрытия поверхности Земли непрерывно смещается по долготе. В проекте системы компании EADS [9] при 4-х спутниках массой 210 кг, на орбитах около 500 км (апертура оптики 0,3 м) с полосой захвата 4,9 км и разрешением 0,7 м полное покрытие всей поверхности Земли можно осуществить за 5 месяцев. Однако из-за облачности реальное обновление информации будет происходить за 2 года (при 8-ми спутниках за 1 год).

Увеличение пространственного разрешения на новых спутниках достигается не только за счёт новых оптических систем, как это уже отмечалось, но, также за счёт уменьшения размера фотоприёмного элемента. Конечно, размер пикселя фотоприёмника должен быть согласован с размером кружка Эйри телескопа. В качестве фотоприёмников в панхроматических каналах нового поколения американских спутников сверхвысокого разрешения используются матрицы ПЗС ВЗН с размером фотоприёмного элемента 8x8 мкм. На "IKONOS" и "QuickBird-2" размер пикселя был в полтора раза больше. Суммарная длина строки фотоприёмников оптико-электронной аппаратуры спутников "GeoEye-1", "WorldView-1", "WorldView-2" составляет около 35,5 тысяч пикселей.

Ещё одной тенденцией развития систем наблюдения является постоянное увеличение длины строки фотоприёмников бортовой оптико-электронной аппаратуры. Это связано со значительными технологическими трудностями. Но и увеличение длины строки в пикселях превращается либо в расширение полосы захвата при сохранении разрешения, либо в повышение разрешения при сохранении полосы захвата. На рисунке 5 показаны

тенденции увеличения (за последние 10 лет и в ближайшей перспективе) длины строки фотоприёмных устройств на ПЗС (оптико-электронных преобразователей - ОЭП), используемых в камерах коммерческих (гражданских) космических аппаратов высокого разрешения.

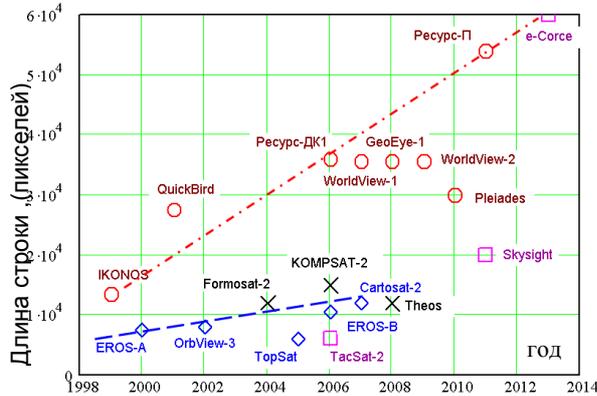


Рис. 5 Тенденции увеличения длины строки фотоприёмной аппаратуры КА высокого разрешения

Чётко выделяются две группы систем, обозначенных пунктирной (нижняя) и штрихпунктирной (верхняя) линиями. К первой группе относятся космические системы с аппаратурой на основе одного, как правило, линейного фотоприёмника ПЗС в строке. За прошедший период длина строки таких ПЗС увеличилась с 6000 – 7000, как на "TopSat" "EROS-A", до 12000 пикселей, как на "Cartosat-2". О низкой информационной производительности таких систем и особенностях асинхронного режима работы говорилось выше.

Максимально возможная длина стороны монокристаллических ПЗС лежит сегодня в районе 12000 – 14000 пикселей. Это означает, что для создания устройств с большей длиной строки необходимо организовывать сборку из нескольких фотоприёмников ПЗС в одном устройстве. Такие технологии уже на протяжении многих лет (с 80-х прошлого века) используются в США, России и Франции для создания широкозахватной аппаратуры высокого разрешения.

Суммарная длина строки фотоприёмных устройств на основе сборок матриц ПЗС постоянно увеличивается.

Широкозахватные, высокопроизводительные системы, которые уже реализованы или находятся в стадии создания, располагаются вдоль верхней штрихпунктирной линии на рисунке 5. За десять лет с 1999 года суммарная длина строки в панхроматических каналах таких систем возросла с 13500 пикселей в аппаратуре ОА КА "IKONOS" до 36000 пикселей в оптико-электронных преобразователях системы приёма и преобразования информации "Сангур-1" съёмочной аппаратуры "Геотон-Л1" российского КА ДЗЗ "Ресурс-ДК1". Этот уровень был достигнут в 2006 году и на сегодняшний день ещё не превзойдён. Большая длина строки оптико-электронных преобразователей СППИ "Сангур-1" на основе матриц ПЗС ВЗН обеспечила совместно с большим полем зрения телескопа аппаратуры "Геотон-Л1" рекордную полосу захвата в 28,4 км при разрешении 0,79 м в надир в перигее. Длина строки панхроматических каналов оптико-электронной аппаратуры американских КА ДЗЗ двойного назначения "WorldView-1" и "GeoEye-1", а также аппаратура спутника "WorldView-2" запуск, которого запланирован на осень 2009 г., составляет около 35500 пикселей [3, 5]. Длина строки французского перспективного спутника оптико-электронного наблюдения двойного назначения, запуск которого ожидается в 2010-2011 г., составит 30000 пикселей в панхроматическом канале [6, 8].

Принцип организации длинной фокальной плоскости (сборки) на основе относительно коротких матриц или линеек ПЗС заключается в том, что фотоприёмники располагаются параллельно на минимальном расстоянии друг от друга в "шахматном порядке". Их размещение напоминает колёвал, а края фоточувствительных зон обязательно перекрываются. Этот метод построения

аппаратуры возможен исключительно для сканирующих систем, осуществляющих съёмку в режиме "заметания" и особенно удобен для аппаратуры, работающей в режиме "Push broom". Он использует свойство непрерывности движения изображения в фокальной плоскости аппаратуры перпендикулярно длинной стороне фотоприёмных линеек или матриц ПЗС, работающих в режиме ВЗН. При наземной обработке устраняется временная задержка между изображениями, формируемыми соседними матрицами или линейками ПЗС и восстанавливается единая общая строка изображения на всю ширину поля зрения.

Целая группа новейших и перспективных спутников высокого и сверхвысокого разрешения, среди которых "Ресурс-ДК1", "WorldView-1", "GeoEye-1", "WorldView-2" и "Pleiades", образует на графике рисунка 6 "плато" на уровне 30000 – 36000 пикселей. Это, возможно, свидетельствует об определённом технологическом рубеже, возникшем перед специалистами разных стран. Этот рубеж может определяться как проблемами в создании ещё более длинных сборок фотоприёмников и проблемами создания многоканальной, высокоскоростной, малозумящей электроники для управления и обработки видеосигналов, так и сложностями создания высококачественных широкопольных оптических систем (телескопов).

Тем не менее, уже в ближайшие годы можно ожидать нового прорыва в сторону увеличения суммарной длины строки космических систем наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения вплоть до 60 тысяч пикселей или даже больше. Решения могут быть найдены по разным направлениям: от применения одного широкопольного объектива и с одной увеличенной сборкой фотоприёмников, как на КА "Ресурс-П",

до применения двух отдельных камер, развёрнутых относительно друг друга и образующих очень большую общую полосу захвата, как это предполагается в проекте французских специалистов "e-Corice".

Ещё одной тенденцией, важной для бортовой аппаратуры, является повышение частоты строк сканирования и стремление к непрерывной съёмке в синхронном режиме "push broom". Так максимальная скорость сканирования аппаратуры при съёмке для КА "EROS-A" составляет 750 строк/с, "EROS-B" уже 2400 строк/с, "OrbView-3" до 5000 строк/с, "IKONOS" – 6500 строк/с, а "Tacsat-2" – 9600 строк/с. Строго говоря, из перечисленных спутников только "Tacsat-2" имеет необходимую частоту строк для работы в синхронном режиме "push broom" и потенциально может осуществлять съёмку очень длинных маршрутов без какого-либо тангажного отслеживания.

Очевидно, что тенденции увеличения длины и частоты строк сканирования приводят к повышению информационной производительности системы. Практическим результатом этого будет увеличение полосы захвата и площади съёмки. Хорошим параметром для определения уровня системы, её сложности, информационной эффективности является внутренняя информационная производительность, выраженная в количестве пикселей изображения, получаемого в единицу времени. При определённых условиях она может выступать универсальным средством сравнения систем. Расчёт в пикселях, а не в битах упрощает сравнение аппаратуры с разной разрядностью цифровой информации, использующей или, наоборот, не использующей сжатие и т.п. При необходимости количество отснятых пикселей легко могут быть пересчитаны в площадь съёмки. В отличие от внешнего параметра, - пропускной

способности радиоканала, внутренняя производительность будет всегда характеризовать предельные возможности съёмочной аппаратуры, которые могут реализоваться, например, при большом количестве приёмных станций.

На диаграммах на рисунках б(а) и б(б) представлены данные по внутренней

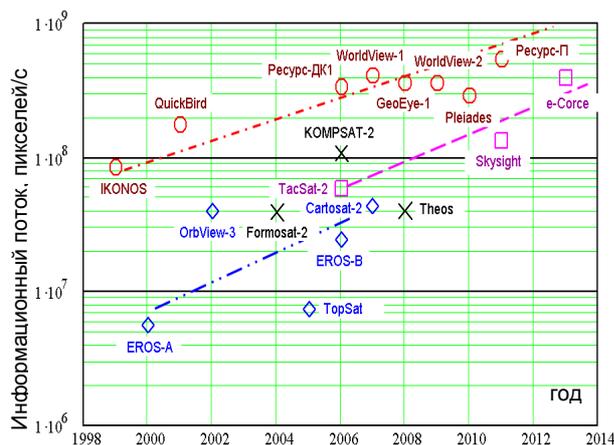


Рис. 6(а). Информационная производительность панхроматической аппаратуры спутников ДЗЗ высокого разрешения

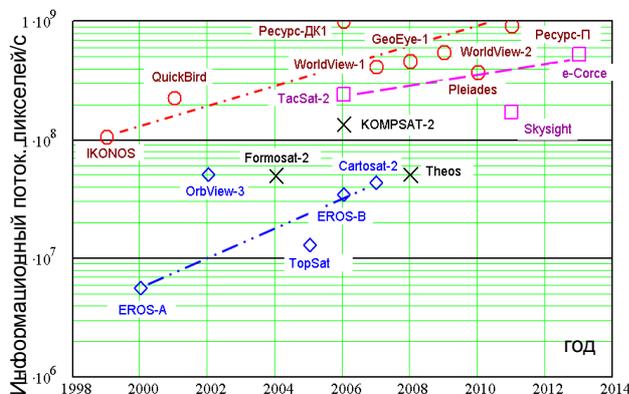


Рис. 6(б). Информационная производительность панхроматической и мультиспектральной аппаратуры спутников ДЗЗ высокого разрешения

информационной производительности оптико-электронной аппаратуры спутников высокого и сверхвысокого разрешения. На рисунке б(а) показана информационная производительность только панхроматических каналов, а на рисунке б(б) – суммарная, включая мультиспектральную аппаратуру.

Бросается в глаза огромная разница в информационной производительности систем, работающих в режиме тангажного замедления (асинхронный) и без него. Эта разница достигает почти двух порядков. Очевидно, что и сами спутники, и установленная на них оптико-электронная аппаратура, обеспечивающие меньшую производительность проще, меньше, легче (рис.4) и дешевле. Информационная производительность лучших КА ДЗЗ уже достигла 1 Гигапикселя/с. Этому соответствуют внутренние потоки информации порядка 10 Гигабит и больше, которые обрабатываются на борту КА в реальном масштабе времени.

Видно, что во всех группах имеется устойчивая тенденция к увеличению информационных потоков, причём количество информации, получаемой космическими аппаратами, увеличилось в каждой группе приблизительно в 10 раз за 10 лет. Новые проекты на основе малых спутников с аппаратурой (ПЗС ВЗН), работающей в синхронных режимах также обозначают прирост потоков информации. Анализ показывает, что для достижения одинаковой плотности получаемой информации проектанты, опираясь на новые технологии, рассчитывают в новых проектах обойтись существенно меньшей массой аппаратуры и спутников в целом.

Завершая сравнение различных космических систем наблюдения необходимо остановиться ещё на одном важнейшем параметре космической информации высокого разрешения - это точности геопривязки данных без использования наземных контрольных точек. На диаграмме (рис.7) приведена точность геопривязки данных высокого разрешения в зависимости от массы спутника ДЗЗ. Видно, что точность геопривязки данных без контрольных точек, получаемая лёгкими спутниками класса "EROS" и "Cartosat", почти в

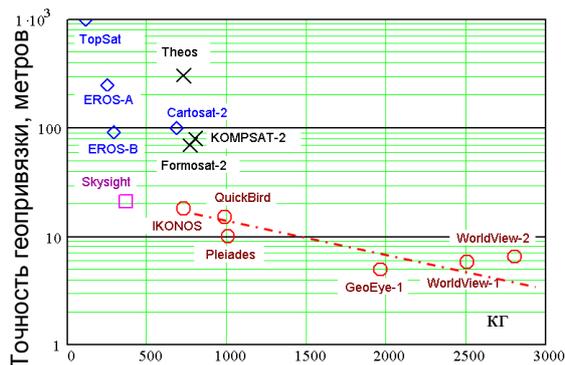


Рис. 7. Точность геопривязки данных аппаратуры спутников ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения

двадцать раз хуже, чем у "тяжёлых" аппаратов последнего поколения. Во всех классах (группах) аппаратов ДЗЗ видна чёткая тенденция, свидетельствующая об увеличении точности с ростом массы. Конечно, это свидетельствует только об увеличении сложности систем ориентации и навигации на современных спутниках ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения, которые призваны обеспечить потребителей максимальным количеством информации с максимальной точностью её геопривязки.

Библиографический список

1. Герберт Дж. Крэмер. Наблюдение за Земной поверхностью и ее окружающей средой – Обзор датчиков и задач, выполняемых с их помощью. 4-е издание // Springer, Берлин, 2002, стр. 1510.
2. Г.Е. Фомин. Фото из космоса: первые шаги // Вестник ракетно-космического центра (ЦСКБ-Прогресс) 8 июля – 5 августа 2009 г.
3. <http://www.digitalglobe>
4. <http://www.geoeye.com>
5. <http://directory.eoportal.org>
6. C528 Кристоф Ринард, Дидайер Дэнтес, Клод невью, Жан-Люк Ламард, Мэтью Удинот, Алекс Мэтерн, «От концепции SED HI – к данным, полученным с измерительного устройства функционального модуля для

спутников «Pleiades» материалы 7-й Международной конференции по космической оптике, 2008, Тулуза, Франция, 14-17 октября 2008 года.

7. <http://www.defense-update.com/directory/erosA1payload.htm>

8. М-р Жан-Люк Ламард, Люк Фрекон, Бруно Бэйли, Кэтрин Годин-Дэлри, Филип Кубик, Жан-Марк Лэхери. «Оптические приборы высокого разрешения для спутников мониторинга земли высокого разрешения «Pleiades»» // 59-й Конгресс Международной Авиационной Конвенции – 2008 (13 страниц).

9. Мр. Эрик Мэльтет, Мс. Лаура Брукер, Мр. Доминик Паулак. «Глобальная съёмка высокого разрешения для новых рынков» // IAC-08-B1.2.7.

References

1. Herbert J. Kramer. Observation of the Earth and its Environment – Survey of Missions and Sensors. 4th Edition // Springer – Verlag, Berlin, 2002. pp. 1510
2. G.Fomin. Imaging from space: first steps // Space-Rocket Center «TsSKB-Progress» bulletin: July, 8-August, 5, 2009.
3. <http://www.digitalglobe>
4. <http://www.geoeye.com>
5. <http://directory.eoportal.org>
6. C528 Christophe Renard, Didier Dantes, Claude Neveu, Jean-Luc Lamard, Matthieu Oudinot, Alex Materne, “From SED HI Concept to Pleiades FM Detection Unit Measurements,” Proceedings of the 7th ICSO (International Conference on Space Optics) 2008, Toulouse, France, Oct. 14-17, 2008
7. <http://www.defense-update.com/directory/erosA1payload.htm>
8. Mr. Jean-Luc LAMARD, Luc FRECON, Bruno BAILLY, Catherine GAUDIN-DELRIEU, Philippe KUBIK, Jean-Marc LAHERRERE. THE HIGH RESOLUTION OPTICAL INSTRUMENTS FOR THE PLEIADES HR EARTH OBSERVATION SATELLITES // 59th IAC Congress – 2008 – (13 pages)

9. Mr Eric Maliet, Ms. Laure Brooker, Mr Dominique Pawlak. GLOBAL

HIGH RESOLUTION IMAGING FOR NEW MARKETS // IAC-08-B1.2.7

STATUS ANALYSIS AND PROGRESS TRENDS OF HIGH- AND ULTRAHIGH-RESOLUTION IMAGING SYSTEMS

© 2010 A.I. Baklanov

Affiliate of FSUE SRP SC «TsSKB-Progress» - scientific production association «NPP ОПТЕКС», Moscow, Zelenograd

The authors endeavor to classify imaging systems basing on performance analysis of various commercial high-resolution remote sensing satellites put into orbit in the last decade. There are singled out stereotyped groups of satellites, described their progress trends and basic modifications, as well, there is considered interdependence among satellite mass, resolution, accuracy and imagery date precision.

Earth remote sensing, optronic equipment, remote sensing satellite

Информация об авторе

Бакланов Александр Иванович, заместитель генерального директора ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» – директор филиала – главный конструктор НПП «ОПТЭКС», к.т.н., тел. 8 (499) 734-94-93. E-mail: optecs@mail.ru. Область научных интересов: авиация, космос.

Baklanov Alexander Ivanovich, deputy director-general FSUE SRP SC «TsSKB-Progress» - affiliated branch director – chief designer of NPP «ОПТЕКС», tel. 8 (499) 734-94-93, E-mail: optecs@mail.ru. Field of interest: aviation, space.