

**А.И. Бакланов** (Филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» НПП «ОПТЭКС»)

В настоящее время – заместитель генерального директора ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», директор и главный конструктор его филиала – НПП «ОПТЭКС». С 2001 г. – доцент кафедры «Телекоммуникационные системы» Московского государственного института электронной техники (МГИЭТ), заведующий базовой кафедрой НПП «ОПТЭКС» «Оптико-электронные приборы и системы» при МИГЭТ. Кандидат технических наук. Заслуженный создатель космической техники.

## К вопросу о пространственном разрешении и точности привязки изображений космических систем наблюдения высокого разрешения

В XXI веке применение геопро пространственной информации, полученной космическими системами наблюдения, стало насущной необходимостью при решении и реализации самых разных задач, научных и социально-экономических проектов. В настоящее время оптико-электронные спутники наблюдения являются основными источниками разнообразной геопро пространственной и спектральной информации о поверхности Земли.

Постоянное улучшение разрешающей способности является основной тенденцией развития систем наблюдения из космоса на протяжении всего периода их существования и развития. На графике (рис. 1), приведенном в [1], представлены некоторые данные по пространственному разрешению различных спутников наблюдения, запущенных и приступивших к работе в период до 2002 г. Разница в пространственном разрешении военных и гражданских КА достигала 1-2 порядков.

Запуск 24 сентября 1999 г. на орбиту первого коммерческого спутника IKONOS, предназначенного для получения в режиме реального времени цифровых

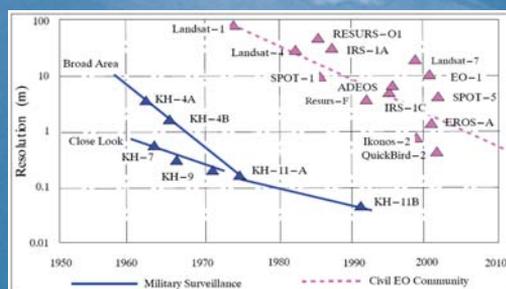


Рис. 1.

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

изображений земной поверхности с пространственным разрешением 1 м и мультиспектральных данных с пространственным разрешением 4 м, открыл новую эпоху в области дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Для широкого круга потребителей стали доступны дан-

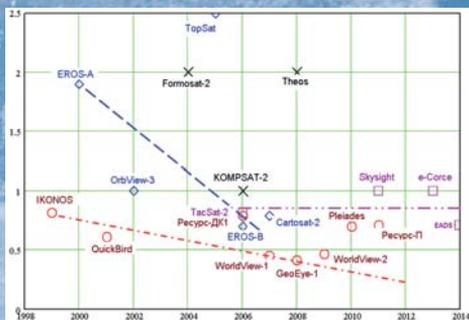


Рис. 2.  
Тенденции изменения пространственного разрешения спутников ДЗЗ высокого разрешения

ные с высоким пространственным разрешением, которые ранее использовались только в разведывательных целях.

За космическим аппаратом (КА) IKONOS последовали другие американские спутники: QuickBird (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 (1,9 м, Израиль, 2000 г.), SPOT-5 (до 2,5 м, Франция, 2002 г.), CARTOSAT-1 (2,5 м, Индия, 2005 г.), FORMOSAT-2 (2 м, Тайвань, 2004 г.). Однако с 2006 г. ситуация начала резко изменяться. В 2006-2007 гг. на орбиту выведены и приступили к работе новые космические аппараты с оптико-электронной аппаратурой высокого (метрового) разрешения: EROS-B (Израиль, до 0,7 м) [2], «Ресурс-ДК1» (Россия, до 0,8 м), KOMPSAT-2 (Корея, 1 м), CARTOSAT-2 (Индия, 0,79 м) [3]. В конце 2007 г. начал работу американский космический аппарат WorldView-1 (0,45 м, компания DigitalGlobe), который открыл новую эпоху коммерческих спутников сверхвысокого разрешения. Потребителям стала доступна панхроматическая цифровая информация с разрешением 0,5 м. Запуск и ввод в эксплуатацию в 2008 и 2009 гг. новых американских коммерческих спутников ДЗЗ GeoEye-1 (0,41 м, компания GeoEye) и WorldView-2 (0,46 м, компания DigitalGlobe) с еще лучшим разрешением только под-

твердили обозначенное направление развития в область сверхвысокого разрешения [4, 5]. Эти аппараты помимо панхроматических изображений, обеспечивают одновременную съемку в 4 и 8 мультиспектральных диапазонах соответственно с разрешением, отличающимся в четыре раза. Вполне возможно, что в дальнейшем 8 спектральных диапазонов, используемых WorldView-2, станут новым «стандартом» для аналогичных систем ДЗЗ.

Тенденции дальнейшего постоянного увеличения разрешающей способности коммерческих систем наблюдения отчетливо видны на диаграмме (рис. 2), на которой выделено несколько групп космических аппаратов.

Знаком  обозначены аппараты: FORMOSAT-2, KOMPSAT-2, THEOS, созданные аэрокосмическими компаниями Европы по заказам стран Азии: Тайвань, Корея, Таиланда. Аппараты созданы 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 м. Но по различным причинам, в том числе, по-видимому, связанным с ограничениями на распространение информации высокого разрешения, только корейский аппарат имеет разрешение 1 м.

Вторая группа, которая обозначена знаком  – это малые КА, осуществляющие съемку в асинхронном режиме. Использование асинхронного режима (тангажного замедления), особенно с большим коэффициентом, существенно упрощает электронную аппаратуру оптико-электронной камеры и позволяет достичь достаточного уровня сигнала за счет увеличения времени накопления. Так, разрешение EROS-A составляет 1,9 м, OrbView-3 – 1 м, а разрешение EROS-B и CARTOSAT-2 уже лучше метра и составляют 0,7 и 0,8 м соответственно. Инструменты перечисленных спутников имеют телескопы с диаметром апертуры от 0,35 до 0,7 м (EROS-A – 0,35; EROS-B – 0,5; OrbView-3 – 0,45; CARTOSAT-2 – 0,7). Из аппаратов этой группы только OrbView-3 был способен осуществлять съемку как в панхроматическом, так и в мультиспектральных диапазонах. Остальные спутники имеют только панхроматический канал. Характерными примерами являются КА EROS-B и CARTOSAT-2, в которых преимущество отдано только разрешаю-

щей способности (0,7–0,8 м) при небольшой полосе захвата 7 и 9,6 км. Так как спутники этой группы работают в асинхронном режиме, то их производительность также невысока. Точность геопривязки данных этих аппаратов составляет около 100 м (CARTOSAT-2).

Следующая группа, обозначенная , это высокопроизводительные спутники высокого и сверхвысокого разрешения, работающие в режиме заметания push broom. Данные спутники имеют высокое разрешение и большую полосу захвата. Пространственное разрешение в этой группе составляет 0,41–0,8 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 – 0,41 м. 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 еще более высокие характеристики. Сообщается о проекте КА GeoEye-2 с разрешением уже 0,25 м.

Основными особенностями нового поколения американских КА ДЗЗ являются: использование крупногабаритной оптики диаметром 1,1 м, новых фотоприемников ПЗС (прибор с зарядовой связью), высокоточной скоростной трехосной системы ориентации и стабилизации, а также радиолинии с большой пропускной способностью. В результате доработок и дооснащения запасами топлива перечисленные аппараты обеспечивают ежедневную производительность до 700 тыс. кв. км в сутки при пространственном разрешении 0,5 м и наилучшей точности геопривязки данных без опорных точек.

Четвертая группа, обозначенная , это экспериментальные мини-спутники и перспективные проекты КА ДЗЗ с относительно высокопроизводительной полезной нагрузкой на основе матриц ПЗС ВЗН (временной задержки и накопления). 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 трех дополнительных мультиспектральных (цветных)

каналах и осуществляет съемку в не очень большой полосе 5 км. При этом, несмотря на свои малые габариты (370 кг), аппарат имеет высокую информационную производительность и может производить съемку без какого-либо тангажного замедления. Дальнейшим развитием подобных технологий, сочетающих в себе решения на основе небольших платформ массой около 300 кг, оптики с диаметром от 0,3 до 0,5 м и использования ПЗС ВЗН, являются проекты мини-спутников ДЗЗ высокого разрешения: SkySight (Великобритания), мини-спутник компании EADS, мини-спутник системы e-Corse, предлагаемой специалистами французской компании Thales Alenia Space. Эти проекты малых КА массой 210–600 кг и разрешением 0,6–1,0 м явно закладывают определенную альтернативную концепцию, отличную от создания больших, высокопроизводительных космических аппаратов с предельными характеристиками по всем направлениям.

Спутник SkySight массой 366 кг имеет в своей основе технические наработки английских и канадских специалистов. В качестве полезной нагрузки рассматривается оптико-электронная камера RaiCam-4 с диаметром оптики 0,48 м. Разрешение этого мини-спутника должно составить 1–1,2 м при полосе захвата около 20 км. Рассматривается вариант и с разрешением 0,5–0,6 м. Проект e-Corse французских и итальянских специалистов предполагает создание группировки из 14 спутников, которая обеспечит ежемесячную съемку всей поверхности Земли с разрешением 1 м. Планируемая масса этих КА – 590 кг. Для обеспечения большой полосы захвата (до 60 км) каждый КА должен иметь по две одинаковые камеры с диаметром оптики 0,3 м. В системах типа e-Corse или аналогичном проекте компании EADS (0,7 м и полосой захвата 4,9 км) предполагается, что спутники вообще не имеют систем для обеспечения перенацеливания, а осуществляют съемку только в надири. Непрерывность покрытия при этом обеспечивается за счет баллистического построения группировки КА, когда зона покрытия поверхности Земли непрерывно смещается по долготе.

Возвращаясь к анализу картины, отображенной на диаграмме (рис. 2), нужно, наряду с общей тенденцией увеличения разрешения во всех основных группах, отметить потенциальную возможность реализовать высокое и даже сверхвысокое разрешение на разных платформах. Это достигается при различных способах наблюдения, а

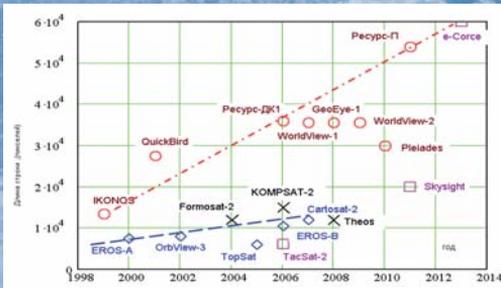


Рис. 3. Тенденции увеличения суммарной длины строки фотоприемной аппаратуры КА высокого разрешения

самое главное — при существенно отличающихся массах полезной нагрузки и космических аппаратов ДЗЗ в целом. В чем же состоит принципиальное различие между этими системами? Посмотрим на это с точки зрения других потребительских характеристик получаемых изображений, к которым, кроме разрешения, можно отнести полосу захвата, точность координатной привязки, а также производительность съемки.

Полоса захвата является одной из важнейших характеристик съемочной аппаратуры спутников ДЗЗ высокого разрешения. Этот параметр напрямую связан с производительностью съемки (снимаемой площадью и количеством получаемой информации). С точки зрения технической реализации ширина полосы захвата определяется, в первую очередь, рабочим полем зрения оптической системы камеры, а также общей длиной строки фотоприемников. Для объективной оценки информативности системы имеет принципиальное значение даже не сама полоса захвата, а ее отношение к пространственному разрешению (проекции пикселя на Землю). Это отношение представляет собой суммарную ширину строки фотоприемников, выраженную в количестве пикселей, и в некотором смысле является общим параметром, характеризующим сложность и совершенство оптико-электронной съемочной аппаратуры, аналогично тому, как элек-

тронные фотоаппараты принято характеризовать и даже классифицировать по количеству пикселей (мегапикселей) в используемой матрице. Чем больше количество пикселей в строке, тем с большим информационным потоком приходится работать системе, цифровать, корректировать, сжимать, хранить, передавать по радиоканалу на Землю. Соответственно сложнее и объемнее становится сама аппаратура наблюдения, а также обслуживающие процесс съемки системы. Анализ по выборке оптико-электронных систем наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения показывает (рис. 3) неуклонную тенденцию роста суммарной длины строки фотоприемников оптико-электронной аппаратуры наблюдения спутников ДЗЗ высокого разрешения во всех классах. Вместе с ростом длины строки и информационной производительности увеличивается и масса оптико-электронной аппаратуры и спутников ДЗЗ в целом (рис. 4).

Конечно, увеличение общей длины строки фотоприемников, соответствующее усложнение аппаратуры и обрабатываемых информационных потоков являются не единственной причиной увеличения массы спутников ДЗЗ высокого разрешения. Об этом же свидетельствует разная скорость прироста массы в различных группах (классах) спутников ДЗЗ при одинаковом увеличении длины строки и объема циркулирующей информации. Показательна тен-

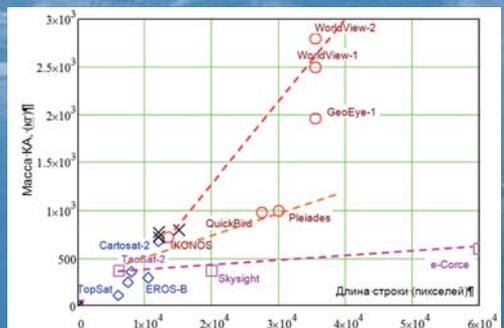


Рис. 4. Увеличение суммарной длины строки фотоприемной аппаратуры и массы КА ДЗЗ высокого разрешения

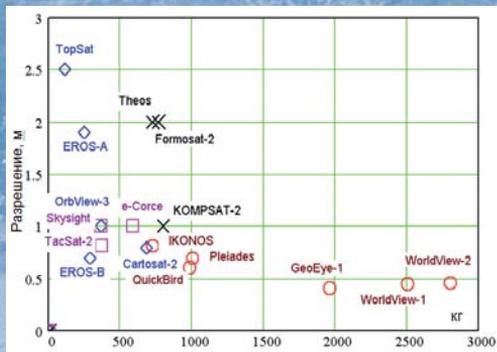


Рис. 5. Диаграмма разрешающей способности и массы КА ДЗЗ высокого разрешения

денция, обозначенная французским КА ДЗЗ PLEIADES [6,7], но особенно наглядно это проявляется на примере американских спутников ДЗЗ сверхвысокого разрешения нового поколения GeoEye-1, WorldView-1 и WorldView-2, которые существенно потяжелели.

Диаграмма на рис. 5 отражает достигнутое разрешение некоторых систем ДЗЗ в зависимости от массы всего спутника вместе с полезной нагрузкой. На этой диаграмме четко выделяется группа спутников сверхвысокого разрешения, у которых при улучшении разрешения с 1 до 0,41 м масса увеличилась с 700–800 кг до 2-3 т. Т. е., перейдя в класс сверхвысокого разрешения, спутники ДЗЗ существенно потяжелели. Так, если масса КА IKONOS и QuickBird-2 составляла 720 и 981 кг соответственно, то масса КА GeoEye-1 составляет 1955 кг, WorldView-1 – 2500 кг, а WorldView-2 – 2800 кг. Очевидно, что кроме повышения информационной производительности (разрешения и длины строки фотоприемников), дополнительные ресурсы массы космических аппаратов были использованы на обеспечение высокой динамики спутника при съемке одновременно с достижением беспрецедентно высокой точности геопривязки получаемых снимков.

Высокая скорость разворотов позволяет быстро перенацеливаться при осуществлении съемки.

Если спутнику IKONOS требовалось для перенацеливания на 300 км по поверхности Земли 18 с, а КА QuickBird-2 – вообще 62 с, то для этой же задачи КА QuickBird-2 потребуются 10 с, GeoEye-1 – 20 с, а WorldView-2 – только 9 с. Это позволяет почти в четыре раза поднять производительность и в десять – маневренность по сравнению с QuickBird-2. При этом появились возможности за счет нескольких соседних сканов осуществлять съемку больших площадок до 60х60 км на одном витке. За счет большой высоты орбиты возросла оперативность съемки. Для QuickBird-2 повторная съемка 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 суток.

Высокая динамика в процессе съемки спутниками GeoEye-1, WorldView-1 и WorldView-2, высокая производительность, высочайшая точность геопривязки получаемых снимков – ок. 3 м без использования опорных точек обеспечиваются применением новой системы трехосной стабилизации и новой системы астроориентации на основе звездных датчиков, которая ранее не использовалась на гражданских КА. Точность определения ориентации составляет 0,4" (3) при точности наведения 75" (3) 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.

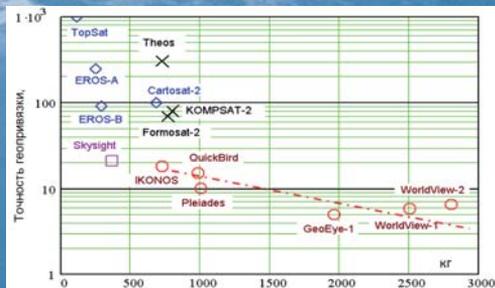


Рис. 6. Точность геопривязки данных аппаратуры спутников ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения

На диаграмме (рис. 6) представлены данные по точности координатной привязки изображений без использования реперных точек для КА ДЗЗ различной массы. Эта диаграмма специально размещена рядом с диаграммой (рис. 5), показывающей взаимосвязь разрешающей способности и массы спутников ДЗЗ высокого разрешения вместе с полезной нагрузкой. Даже беглый взгляд на обе диаграммы показывает их большое подобие, т. е. имеет место большая корреляция между параметрами массы спутника и точностью координатной привязки получаемых изображений. Как правило, чем больше масса спутника ДЗЗ, тем выше точность координатной привязки информации при одинаковом пространственном разрешении. Например, точность геопривязки данных без контрольных точек, получаемая легкими спутниками класса EROS и CARTOSAT, почти в двадцать раз хуже, чем у тяжелых аппаратов последнего поколения. При увеличении массы точность координатной привязки в целом имеет тенденции к улучшению во всех группах спутников ДЗЗ высокого разрешения, достигая максимума у наиболее тяжелых спутников. Это свидетельствует об увеличении сложности систем ориентации и навигации, а также динамических систем, обеспечивающих быстрые развороты и стабилизацию на современных спутниках ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения. Очевидно, что прирост массы, наряду с обеспечением повышения информативности, как раз и был использован на обеспечение конструктивных и приборных решений, повышающих стабильность КА при съемке, точность измерения ориентации КА, а в конечном итоге максимально улучшающих точность координатной привязки получаемых изображений без использования реперных точек.

Таким образом, завершая сравнение современных спутников наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения, можно констатировать, что различные группы спутников, имеющие существенно разную массу при одинаковой разрешающей способности, в действительности существенно отличаются по другим потребительским характеристикам: информационной производительности, поло-

се захвата, динамике при съемке и точности координатной привязки получаемых изображений без использования реперных точек. Только на больших аппаратах максимальные характеристики по основным потребительским параметрам достигаются одновременно. Для малых КА ДЗЗ разработчики не стремятся реализовать предельные характеристики своих систем сразу по всем направлениям (разрешение, число спектральных каналов, производительность, точность), а сосредотачиваются только на одном или нескольких из этих параметров, реализуя необходимую для себя и коммерчески привлекательную для потребителей систему наблюдения.

### Список литературы

1. Herbert J. Kramer. *Observation of the Earth and its Environment – Survey of Missions and Sensors. 4<sup>th</sup> Edition // Springer – Verlag, Berlin, 2002. pp. 1510*
2. <http://www.defense-update.com/directory/erosA1payload.htm>
3. <http://directory.eoportal.org>
4. <http://www.digitalglobe>
5. <http://www.geoeye.com>
6. 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. 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)*