

УДК 681.7.069.32 +629.78 DOI 10.30894/issn2409-0239.2018.5.3.17.28

Новые горизонты космических систем оптико-электронного наблюдения земли высокого разрешения

А. И. Бакланов, к. т. н., optecs@samspace.ru

Филиал АО РКЦ «Прогресс»–НПП «ОПТЭК», Москва, Зеленоград, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрены основные тенденции развития мировой группировки космических оптико-электронных систем наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения. Проведен анализ изменения основных целевых характеристик спутников и аппаратуры наблюдения, таких как разрешение, полоса захвата, периодичность наблюдения и информационная производительность. Большое внимание уделено технической реализации и способам достижения этих характеристик, в том числе и за счет построения больших группировок однотипных спутников.

Подробно анализируются два основных тренда развития оптико-электронных систем ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения на основе «больших» спутников, микро- и миниспутниковых группировок. Приводится сравнительный анализ примененных технических решений, позволяющий определить области применения соответствующих систем в будущем. Рассмотрены новые направления систем наблюдения, такие как «живое видео».

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, ДЗЗ, оптико-электронные спутники высокого и сверхвысокого разрешения, пространственное разрешение, информационная производительность, группировки спутников ДЗЗ

New Horizons of Space Systems of Optical-Electronic Observation of High Resolution Earth

A. I. Baklanov, *Cand. Sci. (Engineering)*, optecs@samspace.ru

Branch of JSC RSC “Progress”, SPE “OPTEKS”, Moscow, Zelenograd, Russian Federation

Abstract. The main trends in the development of the global grouping of cosmic optoelectronic observing systems of high and ultrahigh resolution are considered. The changes in the main target characteristics of satellites and observation equipment, such as resolution, swath width, observation frequency and information capacity, is analyzed. Much attention is paid to the technical implementation and ways to achieve these characteristics, including by building large groups of the same type of satellites.

Two main trends in the development of optical-electronic high-resolution and ultra-high resolution remote sensing systems based on “large” satellites, micro and mini satellite satellites are analyzed in detail. A comparative analysis of the applied technical solutions is made, which makes it possible to determine the areas of application of the corresponding systems in the future. New directions of surveillance systems, such as “live video”, are considered.

Keywords: remote sensing of the Earth, remote sensing, high-resolution and high-resolution optoelectronic satellites, spatial resolution, information capacity, groupings of remote sensing satellites

Начало XXI века стало началом эпохи коммерциализации космических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) высокого разрешения. Восемнадцать лет назад (24 сентября 1999 г.) на орбиту был выведен первый коммерческий оптико-электронный спутник высокого разрешения IKONOS-2 (США). Потребителям во всем мире впервые стали доступны цифровые изображения земной поверхности с пространственным разрешением 1 м и мультиспектральные с разрешением 4 м [1, 2]. Спутник успешно отработал более 15 лет (до 31.03.2015 г.). Последующие годы стали периодом становления мировой группировки таких систем. Гражданские космические оптико-электронные спутники высокого разрешения появились не только у США (Quickbird-2, WorldView-1, GeoEye-1, WorldView-2, WorldView-3, WorldView-4), но и у Израиля (EROS-A, EROS-B), России (Ресурс-ДК1, Ресурс-П № 1, Ресурс-П № 2, Ресурс-П № 3), Кореи (KompSat-2, KompSat-3, KompSat-3A), Индии (CartoSat-1, CartoSat-2, CartoSat-2A, CartoSat-2B), Франции (Pleiades-1A, Pleiades-1B, Spot-6, Spot-7) и ряда других стран [3]. Характеристики некоторых космических аппаратов с аппаратурой высокого и сверхвысокого разрешения приведены в табл. 1.

Далеко не все страны, имеющие в своем распоряжении космические средства наблюдения, обладают техническими возможностями для их создания. В таких случаях государство или компании выступают заказчиком разработки оптико-электронной аппаратуры или спутника целиком или даже покупают и адаптируют для своих потребностей уже ранее созданный аппарат. Количество стран, имеющих собственные средства ДЗЗ, исчисляется уже десятками, да и «клуб» государств, самостоятельно разрабатывающих спутники и оптико-электронную аппаратуру, не мал и включает США, Россию, Францию, Китай, Индию, Израиль, Канаду, Японию, Италию, Великобританию, Германию, Корею. Свои разработки ведут Тайвань, Иран и некоторые другие страны. Разнообразие интересов, технических и экономических возможностей привело к появлению различных вариантов построения космических систем наблюдения. Появляются новые идеи и примеры их реализации, особенно на базе микроспутников. Каковы же современные

тенденции развития средств ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения? Какие новые идеи выдвигаются разработчиками? Какие новые инструменты планируется создать? Какие конфигурации спутниковых систем наблюдения предлагается реализовать в ближайшем будущем? Как и в какие сроки предполагается их реализовать? Как это повлияет на рынок услуг в ДЗЗ? Попробуем рассмотреть как новые идеи в построении систем космического наблюдения, появившиеся в последние годы, так и «старые», уже хорошо проверенные концепции.

Развитие средств ДЗЗ идет нарастающими темпами. Ежегодно на орбиту выводятся два-три десятка спутников ДЗЗ и метеонаблюдений. На диаграмме (рис. 1) представлена статистика запусков по годам космических аппаратов с оптико-электронной аппаратурой сверхвысокого (менее 1 м), высокого (от 1 до 10 м) и среднего (10–250 м) разрешения.

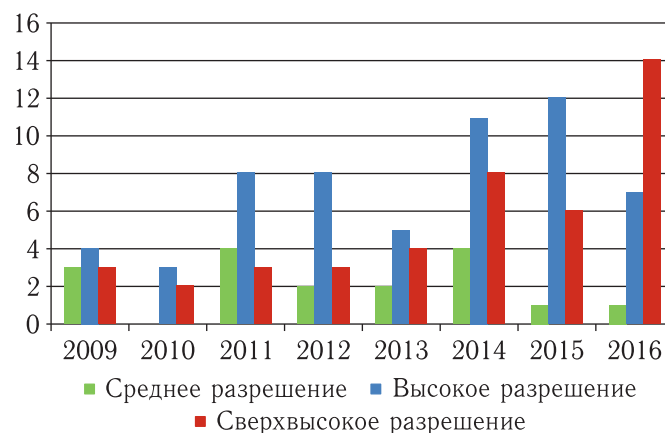


Рис. 1.

В этой статистике не учитываются запуски наноспутников Dove и Flock с оптико-электронной аппаратурой высокого разрешения, о которых будет сказано отдельно. Видно, что доминирующими системами оптико-электронного наблюдения стали системы высокого и даже сверхвысокого разрешения. За последние годы на орбиту выведены десятки космических аппаратов с такой аппаратурой [4, 5]. Характеристики некоторых таких аппаратов, выведенных на орбиту в период 2014–2016 гг., приведены в табл. 2.

Таблица 1. Характеристики спутников ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения

Спутник	Страна	Год	Разрешение, м		Полоса захвата, км	Высота орбиты, км	Масса, кг
			<i>ПХ</i>	<i>МС</i>			
IKONOS-2	США	1999	0,81	3,2	11	700	817
Quickbird-2	США	2001	0,61	2,44	16,5	450	1100
Ресурс-ДК1	Россия	2006	0,8	0,8	28,4	350–600	6570
KompSat-2	Корея	2006	1	4	15	685	800
EROS-B	Израиль	2006	0,7	—	7,1	500	350
WorldView-1	США	2007	0,45	—	16,0	496	2500
GeoEye-1	США	2008	0,41	1,64	15,2	681	1955
WorldView-2	США	2009	0,45	1,8	16,4	767	2800
Pleiades-1A	Франция	2011	0,7	2,8	20	694	1015
Pleiades-1B	Франция	2012	0,7	2,8	20	694	1015
KompSat-3	Корея	2012	0,7	2,8	16,8	685	980
Ресурс-П № 1	Россия	2013	0,7	2,1	38,6	475	6270
DubaiSat-2	ОЭА	2013	1,0	4,0	12,2	600	300
SkySat-1	США	2013	0,9	2,0	8	600	83

Повышение разрешающей способности

Анализ показывает, что наиболее общей тенденцией является стремление к повышению разрешающей способности оптико-электронной аппаратуры спутников ДЗЗ. Это постоянный доминирующий лейтмотив развития космических оптико-электронных систем наблюдения, который нашел отражение практически во всех классах решаемых задач дистанционного зондирования: природопользовании, картографии, в решении задач сельского и лесного хозяйства, предупреждении и контроле чрезвычайных ситуаций и т. п. Точно так же многие практические подходы, связанные с изменением схем наблюдения, высоты орбиты, конструктивных параметров аппаратуры, ее габаритов, а также габаритов спутниковых платформ, в первую очередь направлены на повышение разрешения. Это можно проследить по хронологии появления новых поколений спутников высокого и сверхвысокого разрешения как в отдельных группировках

и странах, так и в целом. Возьмем только несколько примеров. Первый коммерческий космический аппарат ДЗЗ Ikonos-2 (1999 г., компания Space Imaging) имел пространственное разрешение (проекция пикселя на Землю) — 0,81 м, а КА GeoEye-1 (2008 г.), созданный по заказу одноименной компании, ставшей наследницей SpaceImaging, имеет разрешение 0,41 м [6]. Налицо двойное улучшение разрешения. Конкурент Space Imaging — компания DigitalGlobe стартовала в 2001 г. со спутником QuickBird-2 с разрешением 0,61 м. В 2007 г. на орбиту был выведен КА WorldView-1 (разрешение 0,45 м), в 2008 г. — КА WorldView-2 (0,45 м) [7], а в 2014 и 2016 гг. — КА WorldView-3 и WorldView-4 с разрешением уже 0,31 м. Надо отметить, что спутники GeoEye-1 и WorldView-1, -2, -3, -4 создавались после выдачи правительством США лицензии на коммерческие КА с разрешением до 0,25 м, и их аппаратура потенциально может реализовать эти характеристики на более низких орбитах. Однако с коммерческой точки зрения требуется не только высокое разрешение,

Таблица 2. Характеристики КА, выведенных на орбиту в период 2014–2016 гг.

Спутник	Страна	Год	Разрешение, м		Полоса захвата, км	Высота орбиты, км	Масса, кг
			ПХ	МС			
EgypSat-2	Египет	2014	1	4	12,6	720	1080
KazEOSat-1	Казахстан	2014	1	4	20	740	830
Deimos-2	ОАЭ	2014	1	4	12	620	310
SkySat-2	США	2014	0,9	2,0	8	640	83
WorldView-3	США	2014	0,31	1,24	13,1	617	2800
Gaofen-2	Китай	2014	0,8	3,2	45 (2 камеры)	630	2000
ASNARO-1	Япония	2014	0,5	2	10	520	495
Ресурс-П № 2	Россия	2014	0,7	2,1	38,6	475	6570
KompSat-3A	Корея	2015	0,55	2,2	13	530	1112
DMC-3A, -3B, -3C	Китай	2015	1	4	23,4	650	447
Jilin-1	Китай	2015	0,72	2,88	11,6	670	430
Cartosat-2C	Индия	2016	0,65	2,0	11,0	510	727
Ресурс-П № 3	Россия	2016	0,7	2,1	38,6	475	6270
SkySat-C1, -C2, -C3, -C4, -C5	США	2016	0,7	1,56	6,25	500	90 120
WorldView-4	США	2016	0,31	1,24	13,1	617	2087
SuperView-01, -02	Китай	2016	0,5	2,0	12,0	500	560
SkySat-C6–C11 (6)	США	2017	0,7	1,56	6,25	500	120

но и большая полоса захвата. Поэтому оператор космической системы DigitalGlobe [8] решил использовать свои спутники последнего поколения на орбитах, которые позволяют осуществлять съемку с разрешением 31–35 см.

В техническом плане повышение разрешающей способности реализуется либо через увеличение диаметра и фокусного расстояния используемой оптической системы, либо через уменьшение размера пикселей фотоприемных матриц, используемых в аппаратуре, либо просто за счет уменьшения высоты рабочей орбиты. На практике используются все три способа, причем иногда одновременно.

С самого начала эры коммерческих систем ДЗЗ были заложены два подхода к используемым орбитам наблюдения. Первый подход ориентирован на создание наиболее «сложных» и полнофункциональных спутников, предназначенных для работы

на орбитах 700–800 км и, как правило, имеющих крупногабаритную оптическую систему. Такие спутники за счет большой высоты орбиты имеют широкую полосу обзора и хорошую оперативность наблюдения объектов на поверхности Земли. Второй подход изначально ориентировался на использование менее габаритных оптических систем и самих спутников и при меньшей полосе обзора и оперативности обеспечивал достижения примерно тех же параметров по разрешению с круговых орбит меньшей высоты.

Развитие этих тенденций по мере появления все новых и новых оптико-электронных спутников ДЗЗ показано на диаграмме (рис. 2).

На диаграмме видно, что четко выделяются две группы спутников, указанных выше. Но при этом видна тенденция к сближению характерной высоты орбиты для обоих подходов. За прошедшее

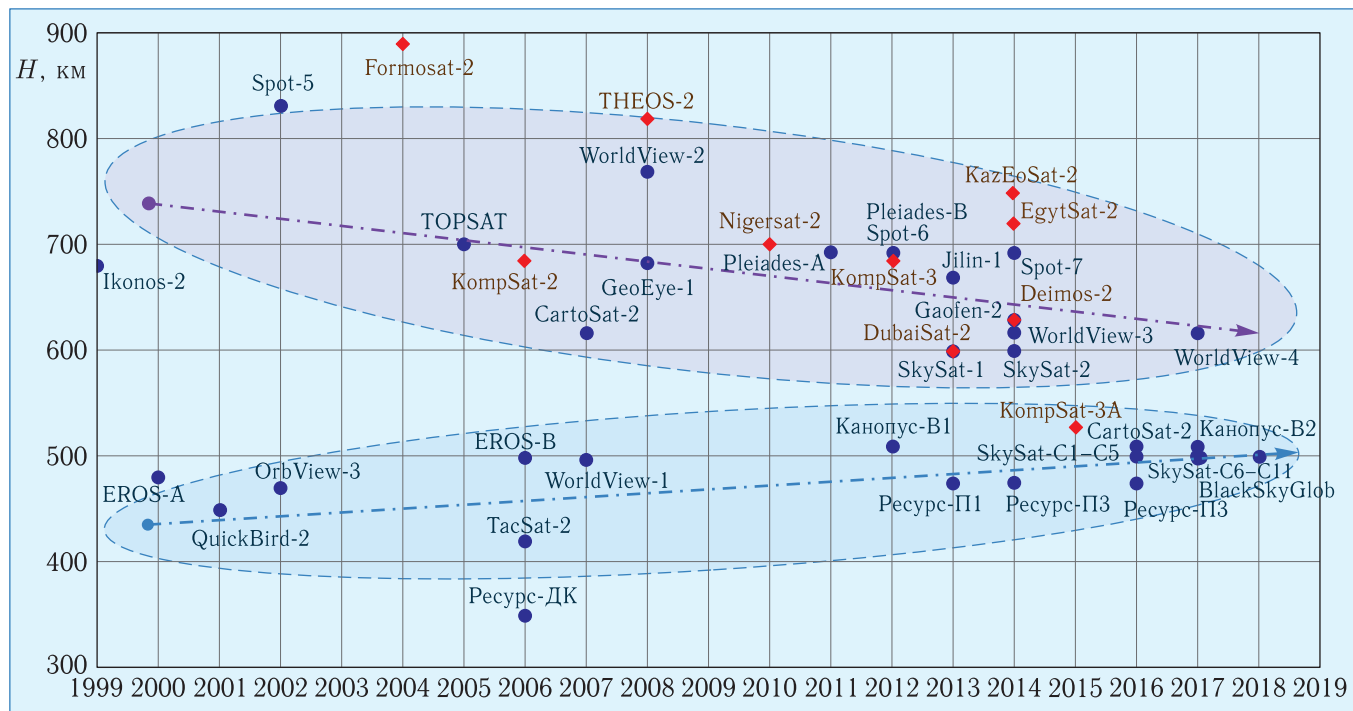


Рис. 2. Типичная высота орбиты опто-электронных спутников ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения

время развития систем ДЗЗ типичная высота орбиты спутников первой группы понизилась приблизительно на 100 км, а второй, наоборот, повысилась на 50 км.

Высота рабочих орбит у спутников последнего поколения WorldView-3 и WorldView-4 понизилась до 617 км вместо 681 и 770 км у GeoEye-1 и WorldView-2 соответственно. Это позволило довести разрешение до 31 см. Аналогично высота рабочей орбиты КА KompSat-3A, запущенного в 2015 г., была снижена до 530 км по сравнению 685 км у KompSat-3, работающего на орбите с 2012 г. Это позволило довести разрешение до 0,55 вместо 0,7 м. При этом полоса захвата соответственно уменьшилась до 13 км вместо имевшихся 16,8 км, т.к. использованы те же детекторы без изменений, и длина строки фотоприемников осталась прежней — 24 000 пикселей.

Красными ромбиками на диаграмме (рис. 2) показаны спутники, созданные по заказу других стран. Их размещение на более высоких орбитах, скорее всего, объясняется принципиальным желанием государств-разработчиков таких аппаратов не допустить серьезной конкуренции со сво-

ими собственными группировками и спутниками. Так как при однотипных решениях разрешение аппаратуры с более высокой орбиты будет несколько хуже. Эта версия находит подтверждение и в других важных характеристиках, например точности координатной привязки информации.

Статистический анализ параметров телескопов, используемых в опто-электронных системах космического наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения, показывает, что имеют место две тенденции изменения диаметра (апертуры) инструмента (рис. 3). Одна направлена на увеличение диаметра апертуры, а вторая, наоборот, на снижение. У обеих этих тенденций одни и те же физические корни и причины. Во-первых, это тяготение к двум уже упомянутым выше группам орбит, во-вторых, ориентация на разный уровень пространственного разрешения 0,20–0,3 м или 0,5–1,0 м, а в-третьих, уменьшение размера пикселей используемых фотоприемников.

В результате требования к используемой оптике получаются существенно разными. Так, разрешение около 30 см спутников WorldView-3, -4 и GeoEye-1, обладающих высокой оперативностью,

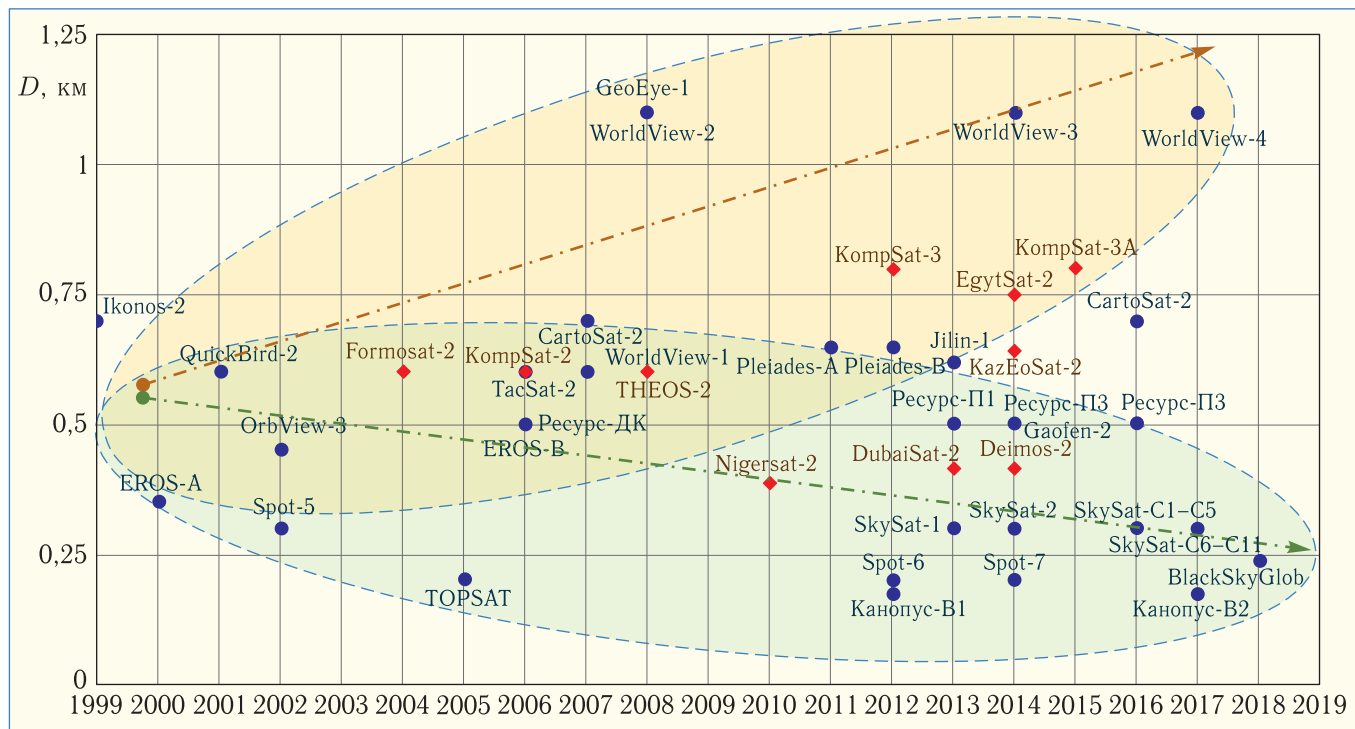


Рис. 3. Две тенденции изменения диаметра апертуры телескопа оптико-электронных спутников ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения

могло быть обеспечено только с высокой орбиты и при диаметре оптики не менее 1 м. Соответственно при переходе от КА Ikonos-2 и QuickBird-2 к новому поколению аппаратуры наблюдения увеличились и параметры используемых оптических телескопов. Диаметр апертуры составляет уже 1,1 м вместо 0,6–0,7 м, а фокусное расстояние выросло до 13–16 м.

Примечательно, что если в начальный период своего развития в космических системах для получения разрешения 1 м использовалась оптика диаметром 0,5–0,7 м, то в настоящее время те же значения реализуются при диаметрах 35–45 см (SkySat, DubaiSat-2, Deimos-2). Более того, создаются системы с заявленным разрешением 1 м при диаметре оптики 24 см. Одной из таких систем является группировка BlackSkyGlob, первые несколько спутников которой планируется вывести на орбиту уже в 2018 г.

Известно, что пространственное разрешение (δ) оптико-электронных систем наблюдения имеет физический предел, который определяется дифракцией света и применительно к системам космичес-

кого наблюдения зависит только от диаметра апертуры космического телескопа (D_{ob}), высоты орбиты (H_{orb}) и длины волны излучения (λ):

$$\delta \approx \frac{\lambda}{D_{ob}} \cdot H_{orb}. \quad (1)$$

Это соответствует радиусу дифракционного кружка Эйри в проекции на поверхность Земли в надир.

В правильно спроектированной и качественно изготовленной оптико-электронной аппаратуре радиус дифракционного кружка в фокально плоскости должен соответствовать размеру пикселя (p) фотоприемной матрицы.

Соответственно проекцию на поверхность Земли (Δ) фотоприемного элемента с размером пикселя p оптической системой с фокусным расстоянием (F_{ob}) в ДЗЗ часто называют пространственным разрешением и сокращенно обозначают аббревиатурой GSD (Ground Sample Distant — размер выборки на поверхности Земли):

$$GSD \approx \frac{p}{F_{ob}} \cdot H_{orb}. \quad (2)$$

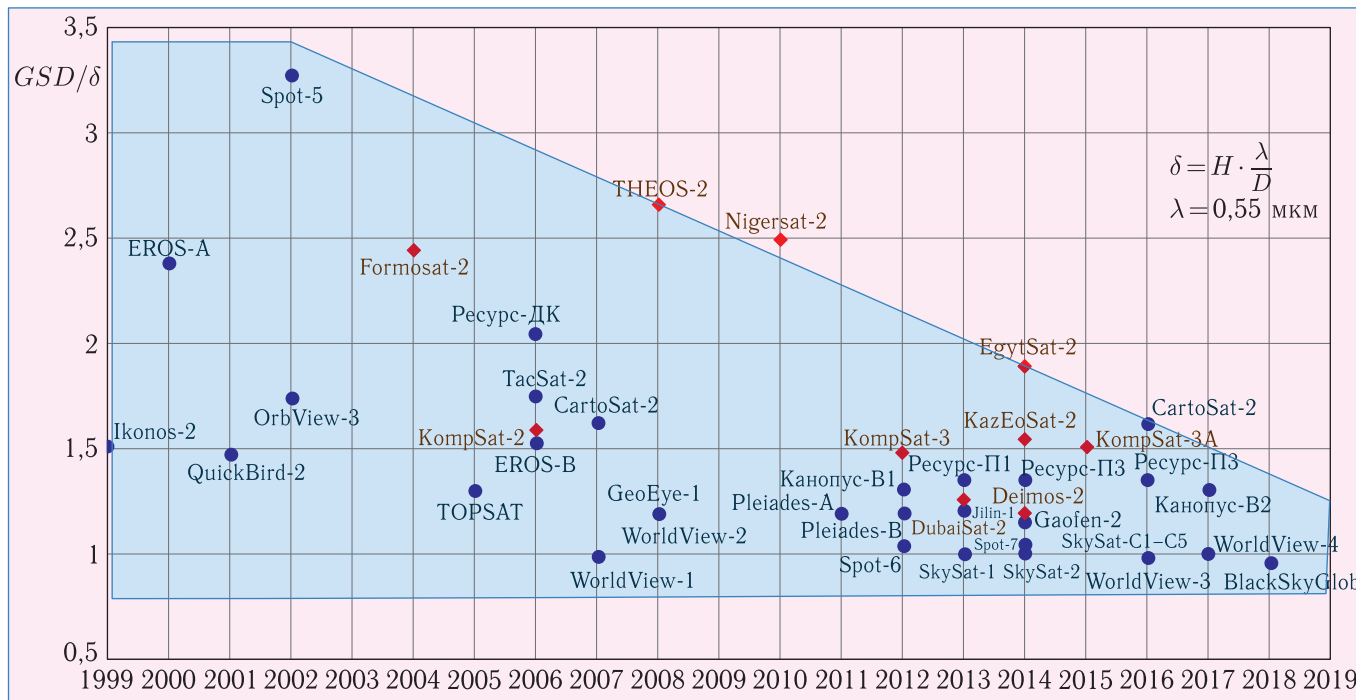


Рис. 4. Степень приближения к предельному пространственному разрешению оптико-электронных спутников ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения

Отношение параметра Δ (или GSD), определяемого проекцией пикселей на поверхность Земли, к величине δ , определяемой дифракцией используемой оптической системы, может являться показателем приближения к предельному разрешению космической аппаратуры. Принципиально важно помнить, что речь идет о теоретическом дифракционном пределе.

На диаграмме (рис. 4) как раз показано отношение GSD/δ для оптико-электронной аппаратуры различных КА высокого и сверхвысокого разрешения. Отношение посчитано для длины волны 0,55 мкм, что соответствует максимуму излучения Солнца.

Из диаграммы видно, что большинство современных оптико-электронных космических систем высокого и сверхвысокого разрешения вплотную приблизились к предельным значениям, а многие практически достигли коэффициента отношения GSD/δ , равного единице. Это свидетельствует о высочайшем качестве космической оптики (поверхности зеркал и стабильности конструкции телескопа), а также фотоприемников и всего электронного тракта.

Но даже при таких условиях для реализации этого потенциала необходима высокая точность управлением движением КА во время съемки и отсутствие вибраций, приводящих к «смазу изображения».

Как уже отмечалось выше, одним из факторов, повлиявших на повышение пространственного разрешения оптико-электронных систем наблюдения, является достигнутое благодаря успехам микроэлектроники уменьшение размера пикселей фотоприемных матриц и вообще повышение характеристик фотоприемников. Так, например, на американских спутниках IKONOS-2 и QuickBird-2 в панхроматическом канале использовались фотоприемники с размером пикселей 12 мкм, а в следующих поколениях спутников GeoEye-1 и WorldView-1, -2, -3, -4 в фотоприемных устройствах используются детекторы с размером пикселей 8 мкм. В связи с тем, что полоса захвата спутников наблюдения очень важна с коммерческой точки зрения для оперативного выполнения заказов съемки площадок, то существенное ее уменьшение при увеличении разрешения не приветствуется. Поэтому длина строки

фотоприемников в детекторах новейших американских коммерческих оптико-электронных спутниках сверхвысокого разрешения достигла 43 тыс. пикселей по сравнению с 13,5 и 27 тыс. у аппаратуры КА Ikonos-2 и QuickBird-2. Еще больше (54 024 пикселей) длина строки в оптико-электронных преобразователях российских спутников ДЗЗ «Ресурс-П» [9]. Это позволило обеспечить полосу захвата в 38,6 км. Кстати, по сравнению со своим предшественником «Ресурс-ДК» количество пикселей в строке увеличилось ровно в полтора раза, а размер пикселей уменьшился также в 1,5 раза до 6 микрон, то есть развитие отечественных средств ДЗЗ идет параллельно теми же путями.

Оперативное выполнение заказов потребителей, в том числе и по площадной съемке, может достигаться не только за счет хорошей полосы захвата и минимизации времени повторного наблюдения, но и за счет большого количества спутников в группировке. Именно таким путем развиваются системы наблюдения компании Planet на основе спутников SkySat с полосой захвата около 8 км.

Повышение информационной производительности

Увеличение пространственного разрешения и полосы захвата, как правило, ведет к существенному возрастанию количества информации, передаваемой на наземные приемные пункты, и тесно связано с информационной производительностью оптико-электронной аппаратуры. Это является еще одной доминантой, характерной для коммерческих систем ДЗЗ высокого разрешения. При этом следует выделять как информационную производительность самой съемочной аппаратуры, так и скорость и объем передаваемой цифровой информации на приемные станции, а также производительность космических систем наблюдения в целом. Традиционно производительность определяют как площадь земной поверхности, снимаемую и передаваемую на приемные станции за одни сутки. Информационная производительность в первую очередь зависит от технических характеристик оптико-электронной аппаратуры и служебных систем спутника. К уже упоминавшимся

длине строки фотоприемника детектора и полосе захвата в первую очередь следует добавить объем бортового запоминающего устройства и скорость сброса информации через радиолинию. При этом определяющим фактором может являться не только возможности бортовой аппаратуры и самого спутника, но и возможности сети наземных станций, обеспечивающих как прием информации ДЗЗ, так и управление спутником (или группировкой спутников) и аппаратурой, установленной на нем.

Объем бортовой памяти оптико-электронных спутников, используемой для хранения снимков высокого и сверхвысокого разрешения, непрерывно растет от поколения к поколению. На первом поколении спутников, к которым следует отнести IKONOS-2 и QuickBird-2, объем бортовой памяти был относительно небольшим и составлял 64 и 128 Гбит соответственно. При этом передача данных на приемные станции выполнялась по радиоканалу с пропускной способностью 320 Мбит/с. Это обеспечивало съемку до 64–100 сцен на витке до заполнения памяти. Объем бортовой памяти космических аппаратов нового поколения увеличился более чем на порядок. Для сравнения: на GeoEye-1 он составлял 1000 Гбит, WorldView-1, -2, -3 — 2199 Гбит, а WorldView-4 — уже 3200 Гбит. Соответственно потребовалось увеличить скорость передачи данных через бортовую радиолинию до 740 (GeoEye-1), 800 (WorldView-1, -2, -4) и 1200 Мбит/с (WorldView-3). Аналогичную эволюцию в развитии претерпевают и космические системы других стран. При этом следует отметить, что радиолинии передачи информации «космос–Земля» в X-диапазоне уже вышли практически на максимальные скорости, и в новых поколениях систем активно рассматривается использование других диапазонов частот, а также исследуются (в том числе и экспериментально) возможности передачи данных на наземные пункты по оптическим каналам.

Эволюцию основных информационных характеристик группировки американских спутников сверхвысокого разрешения, которая принадлежит сейчас компании DigitalGlobe, можно проследить по данным табл. 3. Группировка включает 5 спутников: WorldView-1, GeoEye-1, WorldView-2, WorldView-3 и WorldView-4 [7, 10–13]. На сегодняшний день

Таблица 3. Информационные характеристики группировки спутников сверхвысокого разрешения компании DigitalGlobe

Характеристика	WorldView-1	GeoEye-1	WorldView-2	WorldView-3	WorldView-4
Рабочая высота орбиты, км	496	681	770	617	617
Спектральные диапазоны	Pan	Pan + 4MS	Pan + 8MS	Pan + 8 MS + + 8 SWIR	Pan + 4 MS
Разрешение в ПХ-канале (надир), м	0,50	0,41	0,46	0,31	0,31
Разрешение в МС-каналах, м	нет	1,64	1,85	1,24	1,24
Точность привязки (надир)	6,5 м CE90	3 м CE90	6,5 м CE90	3,5 м CE90	4 м CE90
Полоса захвата, км	17,7	15,3	16,4	13,2	13,1
Период повторной съемки на широте 40° СШ, дни	1,7	< 3	1,1	1,0	1,0
Площадь снимаемой площадки (до 30° от надира), км ²	111 × 112 (6 полос)	45 × 12 (3 полос)	138 × 112 (8 полос)	69 × 112 (5 полос)	66,5 × 112 (5 полос)
Стереоскопическая площадка (до 30° от надира), км ²	51 × 112 (3 пары)	15 × 112 (1 пара)	63 × 112 (4 пары)	28 × 112 (2 пары)	26,6 × 112 (2 пары)
Масса КА, кг	2500	1955	2800	2800	2600
Приводы управления	CMGs	Reaction wheels	CMGs	CMGs	CMGs
Емкость бортовой памяти, Гбит	2199	1000	2199	2199	3200
Скорость передачи данных, Мбит/с	800	740	800	800 или 1200	800

это крупнейшая мировая группировка спутников сверхвысокого разрешения, данные с которой формируют рынок услуг в этой области. Суточная производительность съемки каждого из перечисленных космических аппаратов около 700 тыс. км². В связи с обозначившейся конкуренцией на рынке данных высокого и сверхвысокого разрешения правомерно говорить о суммарной информационной производительности группировки спутников, принадлежащих одному оператору.

Важными параметрами для спутников высокого и сверхвысокого разрешения является возможность снимать на одном витке площадки заданной площади и разрешения, а также производить стереосъемку определенных площадок. Для этого платформа космического аппарата должна сделать возможным перенацеливание на объекты, которое на борту обеспечивается применением маховиков (Reaction wheels) или силовых гироскопов (CMG — Control Moment Gyro). Площадки обычно склады-

ваются из 2–8 полос, снятых на одном витке. Важно, чтобы угол отклонения при съемке не превышал допустимое значение. Это должно гарантировать заданное пространственное разрешение.

Повторяемость и периодичность наблюдения одних и тех же районов космической системой ДЗЗ — это еще одно постоянное требование, которое в значительной степени зависит от орбитального построения. Для спутников последнего поколения этот показатель достиг одного дня (то есть съемку одних и тех же объектов можно повторить через сутки). В начале эры коммерческих средств ДЗЗ высокого разрешения этот показатель составлял 3–7 суток. Кстати, упомянутая выше группировка спутников DigitalGlobe позволяет снимать объекты в среднем до 4,5 раз за сутки.

Очевидно, что периодичность наблюдения непосредственно связана с полосой обзора космического аппарата, а следовательно, и с высотой его орбиты. Высота орбиты не единственный орбитальный

параметр, определяющий периодичность (многое зависит от наклона орбиты и ее эксцентриситета), но именно необходимость достижения высокой периодичности наблюдения в основном определяла (и определяет) запуск спутников на более высокие орбиты, как это показано на диаграмме (рис. 2).

Высокая периодичность наблюдения призвана выявлять быстро происходящие изменения объектов наблюдения. На это же направлена съемка с высоким разрешением в режиме «живого видео».

Видеосъемка поверхности Земли из космоса с высоким разрешением

В последние годы стремительно набирает популярность использование космической бортовой аппаратуры, обеспечивающей видеосъемку с высоким пространственным разрешением. Сейчас у всех на слуху спутники SkySat компании Planet, обеспечивающие панхроматическую видеосъемку площадок $2,0 \times 1,1 \text{ км}^2$ с разрешением 1,1 м. Фотоприемный тракт спутников SkySat реализован на кадровых КМОП-матрицах. Считывание информации происходит с высокой частотой кадров, поэтому реализация режима видеонаблюдения является естественным техническим решением, вытекающим из архитектуры аппаратуры. Для получения панхроматических видеороликов спутник наводится на интересующий объект и удерживает его на своей линии визирования. При этом движение изображения в фокальной плоскости на оси визирования практически останавливается. Некомпенсированными остаются только погрешности, связанные с точностью систем стабилизации систем управления движением. Аппаратура SkySat обеспечивает получение 90 секундных видеороликов в формате HD 1920×1080 с частотой кадров 30 Гц. Формат представления данных MP4. По просьбе заказчика могут представляться данные в расширенном формате 2560×1080 пикселей.

Однако компания Planet с ее спутниками SkySat не является пионером в этом направлении космических систем наблюдения. В далеком 1994 г. немецкая DLR в сотрудничестве с Берлинским техническим университетом создала спут-

ник Tubsat-B, который был выведен на орбиту совместно со спутником «Метеор-3». Проект носил в основном учебный характер. Спутник был оснащен видеокамерой на основе матрицы APS форматом всего 384×288 пикселей и имел разрешение 23×30 м. Это был первый опыт, и КА проработал на орбите только 39 дней. Идея получила продолжение в микроспутнике DLR-Tubsat (1999 г.), который имел в своем составе уже три видеокамеры с разрешением 375, 120 и 6 м. Камеры были созданы на основе кадровых матриц ПЗС форматом 750×580 пикселей размером 8×8 мкм и отличались только характеристиками использованных объективов. Фокусное расстояние камеры с максимальным разрешением составляло 1000 мм, что обеспечило поле зрения видеокadra $6 \times 4,6$ км при разрешении 6 м. Данные непосредственно передавались на Землю в аналоговом виде в стандарте PAL.

Следующие модификации этого КА LAPAN-Tubsat, LAPAN-A2 [14] (с разрешением 6 м) создавались уже по заказу Индонезии. Индонезия отработала методики контроля судоходства с использованием видеосъемки. При этом нужно иметь в виду, что спутники, разработанные DLR, управляются и наводятся на объекты с помощью джойстика в режиме реального времени непосредственно в момент съемки. Камера КА LAPAN-A2 имеет функции автоматического целеуказания для организации взаимодействия с системой управления во время съемки. Некоторые из реализованных проектов спутников высокого разрешения с аппаратурой, обеспечивающей получение видеороликов, показаны в табл. 4.

В 2015 г. Китай запустил одновременно два спутника, Lingqiao Video-A и Lingqiao Video-B, ориентированных только на видеосъемку. Спутники оснащены камерами сверхвысокой четкости 4K форматом 3840×2160 пикселей. Размер наблюдаемого кадра $4,3 \times 2,4 \text{ км}^2$ и длительность видеозаписи 120 с существенно превышают характеристики аппаратуры SkySat. В дальнейшем КНР планомерно наращивал группировку таких спутников и 19 января 2018 г. вывел на орбиту очередные два спутника с аппаратурой видеосъемки Lingqiao-08 и Lingqiao-09. Эти спутники с порядковыми номерами 8 и 9 вошли в группировку Jilin-1 [15, 16].

Таблица 4. Спутники ДЗЗ с аппаратурой съемки видео высокого разрешения

Спутник	Страна	Год	Масса, кг	Формат	Разрешение, м	Поле зрения, км ²	Длительность
DLR-Tubsat	Германия	1994	45	750 × 580 RGB	6	4,5 × 3,5	Сеанс связи
LAPAN-Tubsat	Индонезия	2007	56	750 × 580 RGB	6	4,5 × 3,5	Сеанс связи
LAPAN-A2	Индонезия	2015	68	2048 × 2048 RGB	6	12 × 12	Сеанс связи
SkySat-1, -2; C1-C5; C6-C11	США	2013–2017	80/120	1920 × 1080	1,1	2,0 × 1,1	90 с
Lingqiao Video-A и -B	Китай	2015	95	4K 3840 × 2160	1,1	4,3 × 2,4	120 с
Kent Ridge-1	Сингапур	2015	78	—	6	5,75 × 4,75	
Carbonite-1	Великобритания	2015	91	—	1,5	—	
Iris (UrtheCast)	Канада	—	—	UFHD	1		60 с
Aleph-1	Аргентина	—	37	—	1	—	

Уже через 8 часов после запуска были получены видеоданные о трафике в районе Kunming.

На протяжении нескольких лет на МКС эксплуатируется камера Iris канадской фирмы UrtheCast с разрешением 1 м, осуществляющая съемку цветных роликов длительностью до 60 с с частотой 3 кадра в секунду. Запуск все новых и новых спутников ДЗЗ, таких как Kent Ridge-1 (Сингапур), Carbonite-1 (Великобритания), свидетельствует о развитии этого направления.

В настоящее время данные видеосъемки используются для контроля транспортного трафика как на суше, так и на морских и речных коммуникациях, в портах и на рейдах, мониторинга работы промышленных объектов, строительства, разработки полезных ископаемых открытым способом, мониторинге чрезвычайных ситуаций и т.п. Следует ожидать появления специализированных приложений и программных средств для решения специфических задач, основанных на полученных космических видеоданных в режиме, близком к реальному. Однако говорить о настоящем непрерывном видеомониторинге можно будет говорить только при развертывании очень крупных спутниковых группировок, которые, сменяя друг друга,

обеспечат постоянное наблюдение объектов (или квазипостоянное), а не эпизодическое по полторы-две минуты, как в настоящее время. Правда, облачность и темное время суток будут вносить в этот процесс существенные коррективы.

Список литературы

1. Mark K. Cook, Brad A. Peterson, Gene Dial, Laurie Gibson, Frank W. Gerlach, Kevin S. Hutchins, Robert Kudola, and Howard S. Bowen IKONOS technical performance assessment // Proc. SPIE 4381, 94, 2001. 15 p.
2. Schaap N. IKONOS: future and present // Proc. SPIE 4881, 660, 2003. 9 p.
3. Бакланов А.И. Анализ состояния и тенденции развития систем наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королева, 2010, № 2 (22). С. 80–91.
4. Кучейко А. Мировая отрасль космической съемки в итогах запусков спутников // Земля из космоса, 2016, № 6(22). С. 55–65.
5. Кучейко А. Мировая отрасль космической съемки в итогах запусков спутников ДЗЗ в 2016 году

- и результаты первого квартала 2017 года // Земля из космоса, 2017, № 8 (24). С. 44–59.
6. *Brender M.* GeoEye-1 The Next-Generation Imagery // GIS DEVELOPMENT, 2007, vol. 11, issue 7. P. 58–59.
 7. *Херринг Ч.* Спутник WorldView-2 — новая веха в развитии технологий дистанционного зондирования Земли // Геоматика, 2010, № 2. С. 28–32.
 8. <https://digitalglobe.com> (дата обращения: 08.08.2018).
 9. Космический аппарат «Ресурс-П» / А. Н. Кирилин, Р. Н. Ахметов, А. И. Бакланов, Н. Р. Стратилатов, В. М. Федоров, М. В. Новиков // Геоматика, 2010, № 4. С. 23–26.
 10. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/worldview-1> (дата обращения: 08.08.2018).
 11. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/worldview-2> (дата обращения: 08.08.2018).
 12. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/worldview-3> (дата обращения: 08.08.2018).
 13. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/worldview-4> (дата обращения: 08.08.2018).
 14. <http://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/l/lapan-a2> (дата обращения: 08.08.2018).
 15. http://space.skyrocket.de/doc_sdat/jilin-1-video-01.htm (дата обращения: 08.08.2018).
 16. <https://defence.pk/pdf/threads/two-jilin-1-commercial-earth-observation-video-satellites-lingqiao-07-08.541187> (дата обращения: 08.08.2018).