

УДК 629.785 DOI 10.30894/issn2409-0239.2018.5.4.28.33

Оценка эффективности системы дистанционного зондирования Земли на базе малогабаритных космических аппаратов

С. В. Стрельников, д. т. н., orionsvs@mail.ru

АО «НПО «Орион», Москва, Российская Федерация

В. А. Поливанов, к. т. н., orionsvs@mail.ru

Военная академия РВСН им. Петра Великого, Москва, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрены вопросы сравнительного анализа эффективности двух систем дистанционного зондирования (ДЗЗ) — на основе использования КА типа «Ресурс-П» и малогабаритных КА (МКА). Систему КА как сложную техническую систему следует оценивать по трем направлениям: функциональной эффективности; затратам ресурсов на ее создание и затратам ресурсов на ее эксплуатацию. Оценка затрат ресурсов на создание и эксплуатацию КА типа «Ресурс-П» может быть получена на основе анализа многолетнего опыта их применения. Аналогичные данные для МКА отсутствуют. Поэтому в статье проведено сравнение только функциональной эффективности. При этом оценка двух систем ДЗЗ глобального землеобзора проведена при условии, что применение каждой из них позволяет получать изображения объектов на поверхности Земли с близкими характеристиками и одинаковой периодичностью проведения землеобзора. Показано, что для получения снимков с качеством, соответствующим снимкам КА «Ресурс-П», находящегося на орбите с высотой 535 км, высота орбиты МКА должна составлять 265 км. Срок активного существования КА «Ресурс-П» составляет 5 лет [1], а МКА на такой орбите — около 6 месяцев.

Обосновано, что для обеспечения возможности наблюдения районов Земли с интервалом, не превышающим интервал системы, состоящей из трех КА «Ресурс-П», система МКА должна включать 8 КА. Таким образом, система ДЗЗ МКА, сопоставимая по функциональным характеристикам системе ДЗЗ с тремя КА типа «Ресурс-П», на пятилетнем интервале эксплуатации должна включать около 80 МКА.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, малый космический аппарат

Efficiency Evaluation of the Earth Remote Sensing System Based on Small Satellites

S. V. Strelnikov, Dr. Sci. (Engineering), orionsvs@mail.ru

Joint-Stock Company "Scientific and Production Association "Orion", Moscow, Russian Federation

V. A. Polivanov, Cand. Sci. (Engineering), orionsvs@mail.ru

The Military Academy of Strategic Rocket Troops after Peter the Great, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper considers the issues of the comparative analysis of the efficiency of the two Earth remote sensing systems (ERS) based on the Resurs-P spacecraft and small spacecraft. The system of spacecraft as a complex technical system should be evaluated in three areas: operational efficiency, cost of resources for its creation, and operation. Cost estimate resources for development and operation of satellites of the Resurs-P type can be obtained based on the analysis of a long-term experience of their application. Similar data do not exist for small spacecraft. Therefore, the article compares only the functional efficiency. The evaluation of the two systems was performed assuming that each subsystem produces images of objects on the Earth's surface with similar characteristics and the same periodicity of the observation of the Earth regions. It is shown that to obtain images with the quality relevant to the Resurs-P images in orbit with the altitude of 535 km, the orbital altitude of small spacecraft should be 265 km. The active service life of the Resurs-P spacecraft is 5 years [1], small spacecraft at this orbit is 6 months.

It is proved that to ensure the possibility of the observation of Earth regions with the interval not exceeding the interval of the system consisting of three Resurs-P spacecraft, the small spacecraft system should include 8 spacecraft. Thus, the ERS system of small spacecraft comparable to the functional characteristics of the ERS system with three spacecraft of Resurs-P type should include about 80 small spacecraft during a five-year operation.

Keywords: Earth remote sensing, small spacecraft

Введение

Актуальным направлением развития систем наблюдения земной поверхности является применение малогабаритных (иначе малых, малоразмерных) МКА.

В последние годы все чаще обсуждаются проблемные вопросы создания и эксплуатации систем ДЗЗ на основе МКА, оснащенных бортовой аппаратурой, функционирующей в различных диапазонах волнового спектра. Обоснование областей функционального применения систем ДЗЗ МКА осуществляют выявлением их преимуществ по сравнению с системами, в которых применяют традиционные КА. Исследуется целесообразность создания систем МКА для наблюдения некоторых ограниченных территорий поверхности Земли и использования результатов их эксплуатации в интересах обеспечения национальной безопасности. Актуальность создания систем зонального наблюдения может быть обоснована «региональной направленностью» ряда военных доктрин государств, имеющих стратегическое вооружение и предусматривающих возможность активного влияния на развитие военно-политической обстановки в различных регионах мира путем оперативной передислокации вооруженных подразделений.

В настоящее время выявлен ряд важных проблемных вопросов, связанных с применением МКА для решения задач землеобзора, прямо или косвенно влияющих в целом на эффективность системы ДЗЗ на основе МКА. Для выявления области целесообразного применения МКА следует провести сравнительную оценку эффективности функционирования двух систем ДЗЗ — на основе традиционных и малых КА. Эффективность функционирования системы КА ДЗЗ как сложной технической системы следует оценивать по трем направлениям: функциональной эффективности; затратам ресурсов на создание системы; затратам ресурсов на ее эксплуатацию.

Способ оценки эффективности

Для проведения качественного сравнения двух систем оценку их функциональной эффективности

следует проводить при условии, что обе системы обеспечивают равные или близкие функциональные характеристики. При сравнении систем ДЗЗ это означает, что оценку следует проводить путем сравнения различных систем, применение которых позволяет получать изображения объектов на поверхности Земли с равными или близкими характеристиками и одинаковой периодичностью проведения землеобзора.

Проведем сравнительную оценку только функциональных характеристик, так как данных о затратах ресурсов на создание и эксплуатацию системы МКА в настоящее время недостаточно. Эксплуатация системы КА ДЗЗ осуществляется путем разработки и выполнения программ работы: бортовой аппаратуры, предназначенной для проведения дистанционного зондирования; бортовой аппаратуры, обеспечивающей функционирование вспомогательных систем КА; средств наземного комплекса управления. Оценка затрат ресурсов на эксплуатацию КА типа «Ресурс-П» может быть получена на основе анализа многолетнего опыта их практического применения. Так, например, опыт показал, что для разработки суточной рабочей программы специальной бортовой аппаратуры дистанционного зондирования КА типа «Ресурс-П» достаточно привлечение одного специалиста. При этом для управления каждым КА необходимо не более двух сеансов связи в сутки. Подобные объективные характеристики процесса эксплуатации, свойственные системе МКА, отсутствуют.

Для оценки функциональной эффективности следует использовать следующие характеристики систем ДЗЗ [2]:

- качество (характеристики) получаемых изображений;
- периодичность наблюдения (количество наблюдений в единицу времени) объектов (районов) на Земле;
- производительность системы ДЗЗ.

Рассмотрим последовательно указанные характеристики на примере двух систем ДЗЗ: существующей, состоящей из КА типа «Ресурс-П»; возможной, состоящей только из МКА.

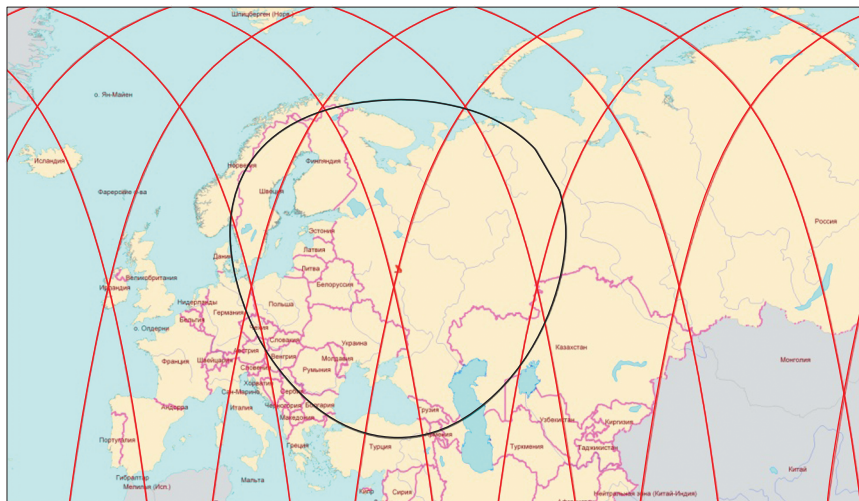


Рис. 1. Типовая зона радиовидимости одного пункта приема информации для КА типа «Ресурс-П»

Количественные значения оценок эффективности

Качество получаемых изображений определяется в первую очередь величиной линейного разрешения на местности (ЛРМ), которое в свою очередь зависит от конструкции оптико-электронного телескопического комплекса (диаметра главного зеркала, фокусного расстояния и др.) и от высоты орбиты КА. Для КА типа «Ресурс-П» значение ЛРМ при наиболее часто используемом панхроматическом режиме составляет 1 м [1]. Указанное значение ЛРМ позволяет решать подавляющее большинство задач, возлагаемых на космические системы ДЗЗ, такие как: создание и обновление топографических карт, планов городов, общегеографических и тематических карт, ведение государственного и топографического мониторинга, а также обновление топографических планов в части объектового состава; контроль загрязнения и деградации окружающей среды; мониторинг чрезвычайных ситуаций (наводнения, засухи, пожары, оползни и др.); государственный экологический мониторинг; инвентаризация природных ресурсов и контроль хозяйственных процессов; поиска нефти, газа, рудных и других месторождений полезных ископаемых и др.

Периодичность наблюдения объектов (районов) на поверхности Земли определяется параметрами орбиты КА, а также значением полосы обзо-

ра КА, то есть участка земной поверхности, съемка которого потенциально возможна при использовании некоторого типа КА. Параметры орбиты и характеристики специальной аппаратуры КА типа «Ресурс-П» обеспечивают периодичность наблюдения любого объекта на поверхности Земли один раз за трое суток. Система из трех таких КА обеспечивает возможность ежесуточного наблюдения любого наземного объекта.

Производительность КА ДЗЗ зависит от следующих характеристик [3]:

- объема бортового запоминающего устройства КА;
- предельной скорости перенацеливания аппаратуры наблюдения КА с одного объекта на другой;
- длительности нахождения КА в зоне радиовидимости наземного приемного пункта информации.

Первые две характеристики зависят от конструкции самого КА, а длительность в зоне в основном — от высоты орбиты. Для КА типа «Ресурс-П» с высотой орбиты 520–550 км проведение сеансов информационного обмена с наземным комплексом возможно на шести видимых витках, а суммарное среднесуточное время нахождения КА в зоне радиовидимости одного наземного пункта приема информации составляет около 40 мин. Как правило, в течение одних суток в среднем осуществляют съемку 250–300 объектов. На рис. 1 для КА с высотой полета 535 км показаны контуры зоны радиовидимости и трассы полета за сутки.

Особенностью малогабаритных КА ДЗЗ является их общая малая масса, а значит, малые масса и габариты специальной аппаратуры, в том числе и оптико-электронного телескопического комплекса. При уменьшении диаметра главного зеркала и фокусного расстояния (в связи с малым размером КА) обеспечение высокого уровня ЛРМ может быть достигнуто за счет снижения высоты орбиты. Оценка возможностей современной элементной базы позволяет сделать вывод, что в малогабаритном КА, имеющем массу не более 1500 кг, может применяться телескоп, способный обеспечить ЛРМ, равное 1 м, только за счет снижения высоты орбиты КА до значений 250–280 км [4].

Длительность орбитального полета низкоорбитального КА существенно зависит от значения баллистического коэффициента. Проведена оценка максимального срока баллистического существования низкоорбитального КА при следующих условиях: параметры атмосферы соответствуют модели [6]; высота начальной околокруговой орбиты составляет 265 км; высота конечной орбиты — 120 км. Математическое моделирование показало, что продолжительность нахождения КА в орбитальном полете при значении баллистического коэффициента, равном $0,002 \text{ м}^2/\text{кг}$, составит около 6 мес, при $0,0015 \text{ м}^2/\text{кг}$ — около 8 мес, при $0,001 \text{ м}^2/\text{кг}$ — около 12 мес, при $0,0005 \text{ м}^2/\text{кг}$ — около 2 лет.

В связи со значительным влиянием атмосферы на движение низкоорбитального КА задачи эффективного применения системы КА ДЗЗ по целевому назначению диктуют необходимость применения двигательной установки для поддержания требуемых параметров орбиты КА и структуры орбитальной системы ДЗЗ глобального наблюдения в целом. Оценка максимального срока активного существования (САС) малого КА проведена при следующих условиях:

- на борту КА находится максимально возможный запас рабочего тела и соотношение массы рабочего тела на борту КА к массе самого КА является предельного допустимым и соответствующим современному развитию космической техники;

- для поддержания высоты орбиты на КА установлена корректирующая двигательная установка с термохимическим двухкомпонентным топливом,

отвечающая современному уровню развития ракетных двигателей;

- значение баллистического коэффициента соответствует средним значениям, свойственным КА с высотой полета 250–280 км;

- КА находится на околокруговой орбите со средней высотой 265 км.

При указанных условиях максимальный срок активного существования такого малого низкоорбитального КА составит не более 180 сут.

Получена оценка периодичности наблюдения наземного объекта с помощью КА, находящегося на солнечно-синхронной орбите с высотой полета 250–280 км. При этом принято, что для съемки объектов максимально допустимый угол крена не должен превышать 45° . Следует отметить, что при больших значениях угла крена требование по ЛРМ не выполняется. При указанных условиях периодичность наблюдения одного любого объекта на поверхности Земли одним МКА составляет один раз за 7–8 сут. Тогда для обеспечения возможности наблюдения любого участка земной поверхности хотя бы один раз в сутки система ДЗЗ, состоящая из МКА, должна включать не менее 8 МКА.

На рис. 2 показаны контуры зоны радиовидимости и трассы за сутки КА с высотой полета 265 км.

Проведенный анализ показал:

- при высоте полета 250–280 км МКА будет находиться в зоне радиовидимости одного приемного пункта информации на двух видимых витках на суточном интервале полета, а среднесуточная длительность пребывания в зоне составит не более 6 мин;

- при существующих характеристиках высокоскоростной радиолинии информационного обмена со скоростью передачи 300 Мбит/с объем информации, потенциально переданной одним МКА в наземный комплекс управления за сутки, будет в 6–7 раз меньше, чем объем от одного КА типа «Ресурс-П».

В таблице приведены полученные значения основных функциональных характеристик КА типа «Ресурс-П» по данным [1] и МКА, полученным по результатам исследования.

Из значений таблицы следует:

- производительность МКА по доставке данных на пункт приема информации по сравнению с КА типа «Ресурс-П» меньше в 2,5–7 раз;

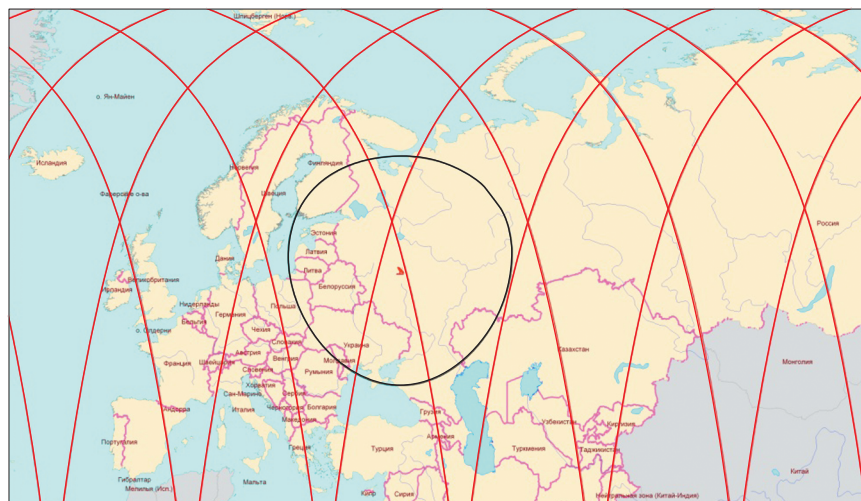


Рис. 2. Типовая зона радиовидимости одного пункта приема информации для КА на высоте 265 км

Таблица. Значения основных функциональных характеристик

Характеристика	КА «Ресурс-П»	Малогабаритный КА
Высота орбиты	535 км	265 км
Ширина полоса захвата	38 км	15 км
Периодичность наблюдения	Один раз за 3 сут	Один раз за 7–8 сут
Суммарное среднесуточное время в зоне радиовидимости одного пункта приема информации	40 мин	6 мин
Срок активного существования	5 лет	6 мес

– периодичность наблюдения любого объекта у МКА по сравнению с КА типа «Ресурс-П» меньше (длительность временного интервала между наблюдениями при использовании МКА больше);

– срок активного существования у малогабаритного КА по сравнению с КА типа «Ресурс-П» меньше в 10 раз.

Рассмотрен возможный способ повышения периодичности наблюдения КА объектов на поверхности Земли, заключающийся в изменении наклона орбиты КА с обратного (для солнечно-синхронной орбиты) на прямое, описанный в работе [5]. Исследование показало, что применение

данного способа для построения орбиты МКА приводит к перерыву в наблюдении объектов в оптическом диапазоне радиоволн до одного месяца в связи с нарушением условий освещенности.

Таким образом, чтобы обеспечить гарантированное наблюдение любого объекта на земной поверхности 1 раз в сутки с линейным разрешением на местности, равным 1 м, система КА ДЗЗ должна включать 3 КА типа «Ресурс-П» или не менее 8 МКА. Штатный срок функционирования КА «Ресурс-П» на орбите составляет 5 лет. С учетом срока активного существования МКА, находящегося на орбите с высотой 250–280 км, система ДЗЗ МКА, сопоставимая по функциональным характеристикам с системой ДЗЗ с 3 КА типа «Ресурс-П», должна включать около 80 МКА. Полученная оценка количественного состава двух систем представлена на рис. 3.

Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать предположение, что орбитальную группировку, состоящую из трех КА типа «Ресурс-П», обеспечивающую глобальное наблюдение Земли в оптическом диапазоне радиоволн, при равной функциональной эффективности и пятилетнем сроке эксплуатации может заменить орбитальная группировка, включающая около 80 малогабаритных КА.

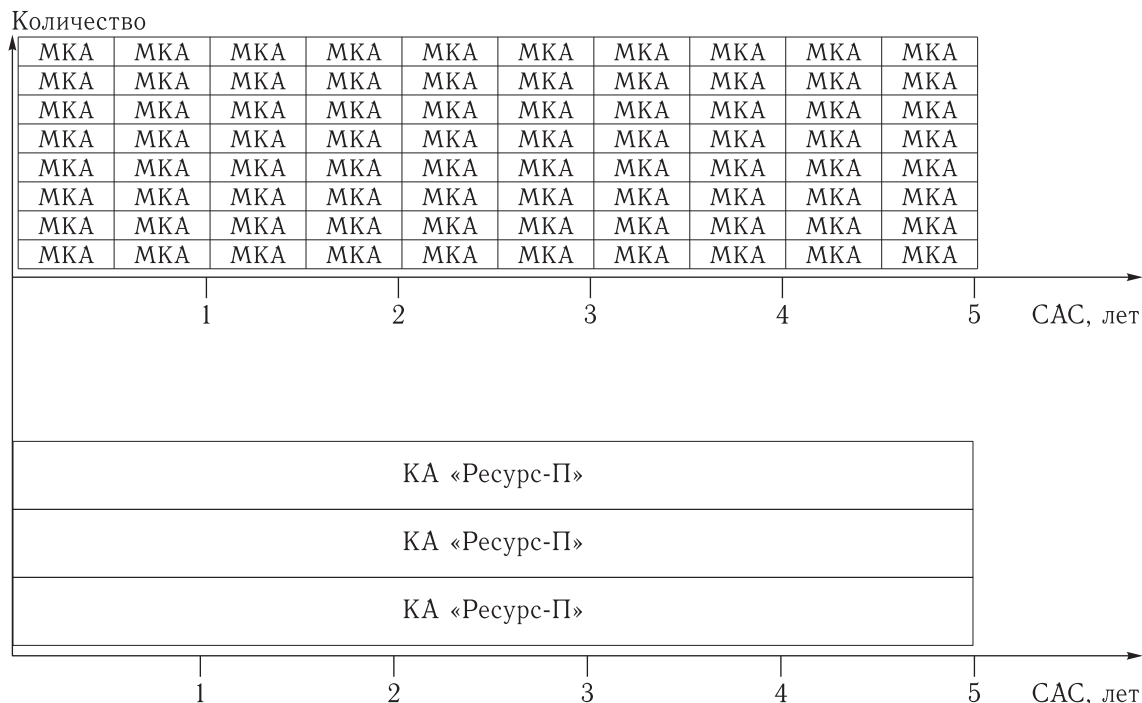


Рис. 3. Количественный состав систем ДЗЗ глобального наблюдения на пятилетнем интервале, состоящий из МКА или КА типа «Ресурс-П»

Полученная оценка количественного состава позволяет формировать требования к затратам на создание и эксплуатацию МКА. Очевидно, что стоимость создания и эксплуатации двух различных систем ДЗЗ глобального наблюдения Земли может быть равной только в случае, если затраты ресурсов на создание и эксплуатацию одного МКА окажутся в 23 раз ниже стоимости КА типа «Ресурс-П». Затраты ресурсов на эксплуатацию МКА в настоящее время неопределенны. Однако с учетом принятой технологии разработки рабочих программ бортовой аппаратуры следует предположить: трудоемкость разработки и затраты ресурсов на эксплуатацию одного КА типа «Ресурс-П» и одного МКА сопоставимы; затраты ресурсов на эксплуатацию системы ДЗЗ в целом пропорциональны количеству КА в орбитальной системе.

Следует подчеркнуть, что полученные сравнительные оценки свойственны системе ДЗЗ глобального наблюдения. Подробная оценка эффективности системы ДЗЗ зонального наблюдения может быть осуществлена с учетом размеров и геогра-

фического расположения требуемых районов наблюдения.

Список литературы

1. <http://russianspacesystems.ru/bussines/dzz/orbitalnaya-gruppirovka-ka-dzz/resurs-p/> (дата обращения: 09.11.2018).
2. Микрин Е. А. Бортовые комплексы управления космических аппаратов: Учеб. пособие. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 245 с.
3. Черноруцкий И. Г. Методы принятия решений. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 415 с.
4. Хартов В. В., Ефанов В. В., Занин К. А. Основы проектирования орбитальных оптико-электронных комплексов. Учеб. пособие. М.: Издательство МАИ, 2011. 133 с.
5. Власов С. А. Основы баллистического проектирования систем КА землеобзора. СПб.: МО РФ, 1998. 94 с.
6. ГОСТ Р 25645.166-2004. Атмосфера Земли верхняя. Модель плотности для баллистического обеспечения полетов искусственных спутников Земли.