

Оценка эффективности многоспутниковых космических систем дистанционного зондирования Земли

М. А. Иванушкин^{1,2}, И. С. Ткаченко¹

¹ Самарский национальный исследовательский университет
им. акад. С. П. Королёва, Самара, 443086, Россия

² Институт систем обработки изображений РАН — филиал ФНИЦ
«Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, 443001, Россия
E-mail: ivanushkin.ma@ssau.ru

Рассматриваются многоспутниковые космические системы мониторинга Земли, обеспечивающие глобальный обзор. Цель работы — создание комплексной модели для оценки эффективности многоспутниковых космических систем мониторинга. Во-первых, рассмотрены вопросы проектирования современных многоспутниковых космических систем дистанционного зондирования Земли и проанализирован состав многоспутниковой системы компании Planet. Во-вторых, исследованы модели для оценки покрытия, оперативности и периодичности, а также предложено ввести ряд ограничений при выполнении имитационного моделирования. Показано, что использование таких ограничений в процессе имитационного моделирования позволяет проводить настройку системы, моделировать различные сценарии работы бортовой аппаратуры, благодаря чему можно получить результаты, приближённые к реальности. И наконец, предложена комплексная модель для оценки эффективности многоспутниковых космических систем дистанционного зондирования Земли. В состав разработанной модели входят модель оценки охвата космических аппаратов, модели оценки работоспособности и периодичности наблюдения. В результате проведено моделирование и выполнена оценка эффективности трёх космических систем, обеспечивающих глобальный обзор поверхности Земли со временем повторного посещения любой точки не менее одного раза в сутки.

Ключевые слова: малый космический аппарат, космические системы дистанционного зондирования Земли, многоспутниковые системы

Одобрена к печати: 14.08.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-101-110

Введение

Многоспутниковые космические системы состоят из сотен и даже тысяч космических аппаратов (КА) на низких орбитах с высотами от 500 до 1600 км. В настоящее время их широкое развитие связано с возросшими требованиями к глобальности, скорости и объёму обмена информацией. Эти системы позволяют эффективно решать задачи дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (Ivliev et al., 2022), широкополосного доступа в интернет, навигации, метеорологии, телерадиовещания и др.

В различных странах мира сейчас создаются (или прорабатываются вопросы создания) примерно 20 таких систем. В области космических систем мониторинга известны следующие многоспутниковые космические системы: Planet, Satellogic, BlackSky, Capella, ICEYE, Landmapper и WorldView Legion.

Одной из самых известных космических систем дистанционного зондирования Земли выступает группировка американской компании Planet (Boshuizen et al., 2014). Компания Planet на сегодняшний день владеет двумя орбитальными группировками КА. Первая из них — PlanetScore, которая состоит примерно из 130 спутников Dove и способна ежедневно получать изображения всей земной поверхности. Производительность такой системы — 200 млн км² поверхности Земли в сутки. В настоящее время на орбите функционируют малые космические аппараты (МКА) Dove трёх поколений: Dove Classic, Dove-R, SuperDove, все космические аппараты находятся на солнечно-синхронной орбите с высотой от 450 до 580 км. Вторая группировка — SkySat. По состоянию на III квартал 2022 г. в состав

группировки SkySat входит 21 космический аппарат. Данная группировка обеспечивает частоту посещения любой точки Земли до 10 раз в сутки. Производительность системы — до 400 тыс. км² в сутки.

Анализ построения современных систем ДЗЗ, проведённый в работе (Ivanushkin et al., 2022), показал, что наблюдается тенденция к развёртыванию многоспутниковых группировок, состоящих из малых спутников. Зачастую для этого используются малые космические аппараты массой от 3 до 500 кг, функционирующие на солнечно-синхронных орбитах. Цель таких систем состоит в обеспечении глобального и непрерывного обзора Земли.

Возможность собирать и обрабатывать большие объёмы данных с космических аппаратов изменила способ понимания изменений Земли и процессов, которые их формируют. Многоспутниковые космические системы ДЗЗ ещё больше расширили эти возможности, обеспечивая более полный и частый охват поверхности Земли. Однако с увеличением количества спутников и растущим спросом на данные важно оценивать эффективность этих систем, чтобы обеспечить их оптимальное функционирование.

Вопросами проектирования космических систем дистанционного зондирования занималось большое количество исследователей. При этом многие работы были посвящены выбору орбитальной структуры многоспутниковых систем, что становится одним из ключевых моментов при проектировании многоспутниковых группировок. Известны несколько подходов к формированию орбитальной структуры спутниковых систем. В работах (Gobet, 1961; Luders, 1961; Vargo, 1960) представлены методы, которые основываются на выборе непрерывной полосы обзора КА, находящихся в одной плоскости. Данные методы не учитывают возможность фазирования КА в системе, т.е. взаимное положение КА в таких системах не принималось в расчёт. В исследованиях (Easton, Brescia, 1969; Ullock, Shoen, 1963) было предложено учитывать согласование взаимного положения КА при выборе орбитального построения. Для построения многоспутниковых систем глобального и непрерывного обзора в работах (Можаев, 1972, 1973, 1989) была предложена методика, основанная на теории групп. В исследованиях (Walker, 1970, 1971, 1984) получены методические рекомендации, основанные на базе эмпирического подхода, по выбору оптимальных многоспутниковых систем, обеспечивающих глобальный и непрерывный обзор Земли.

Существенно меньше работ направлено на комплексную оценку эффективности многоспутниковых систем, учитывающих характеристики не только орбит, но и бортовой и съёмочной аппаратуры. Цель настоящей работы заключается в создании комплексной модели для оценки эффективности многоспутниковых космических систем мониторинга.

Модели для оценки эффективности космической системы дистанционного зондирования Земли

Разработаны модели для оценки показателей эффективности, учитывающие зону обзора целевой аппаратуры спутника, географическое расположение приёмных пунктов, а также такие параметры космического аппарата ДЗЗ, как ёмкость бортового запоминающего устройства и задержки в работе передающей аппаратуры.

Модель для оценки зоны обзора КА

Аппаратура наблюдения характеризуется углом обзора γ_0 и при съёмке в надир охватывает на поверхности Земли сферический сегмент. В этом случае размеры снимаемой поверхности характеризуются центральным углом φ_E (рис. 1, см. с. 103):

$$\varphi_E = \frac{\pi}{2} - \arcsin \left(\frac{R_E + H}{R_E} \sin \gamma \right) - \gamma ,$$

где R_E — радиус Земли; H — высота орбиты.

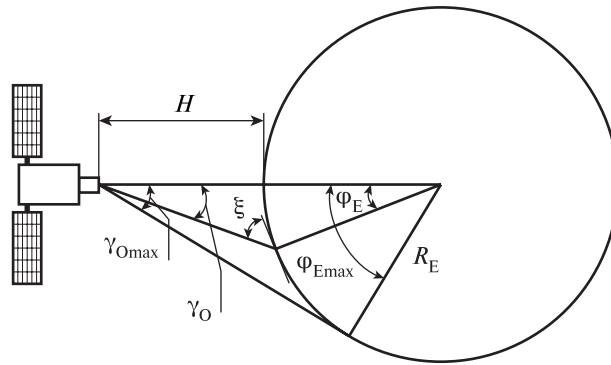


Рис. 1. Зона обзора КА ДЗЗ

Максимально возможная для наблюдения территория Земли, охватываемая космическим аппаратом, характеризуется предельным углом $\varphi_{E \max}$:

$$\varphi_{E \max} = \arccos \left(\frac{R_E}{R_E + H} \right).$$

В свою очередь, площадь покрытия может быть рассчитана как площадь поверхности сегмента шара:

$$S = 2\pi R_E^2 (1 - \cos \varphi_E).$$

С помощью приведённых выше несложных соотношений в процессе моделирования орбитального движения космической системы становится возможным отслеживать факт попадания объекта в зону видимости съёмочной аппаратуры, оценивать продолжительность сеанса связи с наземными приёмными пунктами, а также площадь отснятой территории.

Модели для оценки оперативности и периодичности

Оперативность оценивается для каждого объекта наблюдения и складывается из нескольких составляющих, а именно времени:

- необходимого для проведения съёмки заданной территории;
- записи и ожидания информации в бортовое запоминающее устройство (БЗУ);
- необходимого для передачи информации с борта КА на наземный пункт приёма информации (НППИ).

Показатели периодичности орбитальной группировки космических аппаратов ДЗЗ существенно зависят от баллистических характеристик и количества спутников орбитальной группировки, от организации схемы обзора земной поверхности, высоты полёта и характеристик оптических систем. В зависимости от решаемой задачи периодичность может оцениваться как период между двумя последовательными по времени полёта КА попаданиями объекта наблюдения в зону обзора летящего КА:

- с заданными координатами;
- со случайными координатами;
- с заданными координатами и с учётом вероятностных характеристик погодных условий над снимаемой территорией.

В настоящей работе периодичность оценивается для каждого объекта наблюдения и отражает время, которое проходит между съёмками данного объекта космическими аппаратами группировки. При этом фиксируется каждый факт попадания объекта наблюдения в зону обзора КА, что позволяет получить минимальное, среднее и максимальные значения периодичности.

Ограничения

В настоящей работе предлагается учитывать ограничения в работе КА, связанные с задержкой:

- между съёмкой двух последовательных объектов;
- перед съёмкой после передачи данных;
- перед отправкой данных после съёмки;
- между съёмкой одного и того же объекта;
- между передачами данных.

Использование указанных ограничений позволяет в процессе имитационного моделирования проводить настройку системы, моделировать различные сценарии работы бортовой аппаратуры, благодаря чему можно получить результаты, более близкие к реальности.

Моделирование работы многоспутниковых систем космического мониторинга

Общие положения моделирования

Для систем космического мониторинга предполагалось, что съёмка ведётся только на освещённой части витка, межспутниковые линии связи отсутствуют, накопленная информация передаётся на первую наземную станцию после съёмки, если выполняются ограничения.

В качестве объектов наблюдения использовались координаты пересечения долготы и широты с шагом 10° — такое расположение позволит оценить глобальность обзора космической системы, а также оценить эффективность того или иного расположения наземных станций.

В качестве проектных характеристик космического аппарата ДЗЗ задаются следующие параметры:

- минимальный угол Солнца над горизонтом, при котором КА может проводить съёмку;
- ширина полосы захвата оптической аппаратуры;
- максимальный угол отклонения КА;
- пространственное разрешение целевой аппаратуры;
- максимальное количество снимков, которое может вместить бортовое запоминающее устройство.

Моделируемые космические системы

В настоящей работе моделируются три многоспутниковые космические системы. Первая — это группировка Planet. В качестве исходных данных для моделирования использовались данные о целевой аппаратуре (Boshuizen et al., 2014; d'Angelo et al., 2014; Marshall, Boshuizen, 2013), информация об орбитальном движении (<https://ephemerides.planet-labs.com>) космического аппарата и координаты наземной приёмной сети (Colton, Klofas, 2016). Особенностью группировки компании Planet представляется совместное использование КА ДЗЗ со средним пространственным разрешением и КА ДЗЗ, способных создавать детальные снимки. При этом достаточно узкая полоса захвата и того, и другого аппарата, вызванная малыми геометрическими размерами оптико-электронной аппаратуры, вынуждает поддерживать общую численность аппаратов в орбитальной группировке примерно в 200 шт., для того чтобы обеспечить ежесуточное обновление информации обо всей поверхности Земли. В *табл. 1* приведены основные характеристики группировок PlanetScope и SkySat.

Известно, что для обслуживания группировки Planet используется распределённая сеть НППИ. В *табл. 2* представлены приблизительные географические координаты эксплуатируемых НППИ.

Также было выполнено моделирование работы двух многоспутниковых космических систем, которые, как ожидается, смогут проводить мониторинг практически всей поверхности

Земли не реже одного раза в сутки. За исходную принята солнечно-синхронная орбита высотой 490 км. Предполагалось, что КА равномерно распределены по плоскостям, которые, в свою очередь, равномерно распределены по долготе восходящего узла. Характеристики космических систем приведены в *табл. 3*.

Таблица 1. Состав группировки Planet

Космический аппарат	Группировка PlanetScope			Группировка SkySat
	Dove	Dove-R	Super Dove	SkySat
Масса, кг	5			120
Габариты, мм	100×100×300			600×600×950
Количество КА в группировке	>130			21
Высота орбиты, км	450–580			SkySat-1, -2: 600 SkySat-3...-15: 500–450 SkySat-16...-21: 400
Наклонение, град	~98, солнечно-синхронная орбита (ССО)			SkySat-1...-15: 97,8 (ССО) SkySat-16...-21: 53
Размер кадра снимаемой поверхности, км	24×8	24×16	32,5×19,6	8
Разрешение, м	3,0–4,1 (в зависимости от высоты)		3,7–4,2 (в зависимости от высоты)	0,5

Таблица 2. Географические координаты НППИ, эксплуатируемых компанией Planet

Номер НППИ	Страна	Местоположение	Координаты
1	Исландия	Рейкьявик	64,12° с. ш., 21,87° в. д.
2	Великобритания	Кардифф	51,49° с. ш., 3,19° з. д.
3	Германия	Берлин	52,49° с. ш., 13,44° в. д.
4	Австралия	Брисбен	27,54° ю. ш., 153,05° в. д.
5	Новая Зеландия	Инверкаргилл	46,42° ю. ш., 168,38° в. д.
6	США	Кливленд, Огайо	41,45° с. ш., 81,69° з. д.
7		Девилс Лейк, Северная Дакота	48,11° с. ш., 98,87° з. д.
8		Ньюберг, Северная Дакота	48,71° с. ш., 100,91° з. д.
9		Лас-Крусес, Нью-Мексико	32,34° с. ш., 106,76° з. д.
10		Сан-Франциско, Калифорния	40,40° с. ш., 122,64° з. д.
11		Анкоридж, Аляска	61,16° с. ш., 149,71° з. д.
12		Гавайи	20,73° с. ш., 156,29° з. д.

Таблица 3. Характеристики космических систем

Параметры	Вариант 1	Вариант 2
Общее количество спутников в группировке	48	24
Количество плоскостей	6	3
Распределение плоскостей по долготе восходящего узла, град	30	60
Высота орбиты, км	490	490
Наклонение, град	97,3	97,3
Максимальное затрачиваемое время съёмки за виток, с	400	400
Минимальная высота Солнца над горизонтом, град	10	10
Максимальный допустимый угол отклонения при съёмке, град	30	30
Время подготовки изображения для отправки, с	1800	1800
Полоса захвата, км	30	30

Вариант 1 представляет собой группировку с наибольшей численностью космических аппаратов. Всего в её состав входит 48 МКА, равномерно распределённых по шести орбитальным плоскостям, которые, в свою очередь, распределены по всей земной сфере со сдвигом по долготе восходящего узла орбиты. Орбитальная структура варианта 2 в два раза меньше варианта 1, распределение орбит по долготе восходящего узла составило 60° . Для обоих анализируемых случаев рассматривалась наземная инфраструктура, состоящая из 10 станций, расположенных на территории Российской Федерации.

Результаты моделирования

Для того чтобы выявить зоны поверхности Земли, которые снимаются реже, а также зоны, из которых информация доставляется на НППИ дольше всего, были построены тепловые карты распределения периодичности и оперативности. На *рис. 2* показаны тепловые карты периодичности и оперативности доставки информации группировки Planet. Зоны с максимальной периодичностью и оперативностью отмечены красным цветом.

Как видно из *рис. 2*, космическая система Planet обеспечивает высокую периодичность наблюдения (до 98 мин) территорий Евразии, Африки, Австралии и Антарктиды. При этом наихудшая частота наблюдений — на территории Северной и Южной Америки. Такие результаты можно объяснить сочетанием наложенных на систему ограничений и выбранной даты моделирования. Тем не менее результаты моделирования хорошо согласуются с данными, представленными разработчиками космической системы.

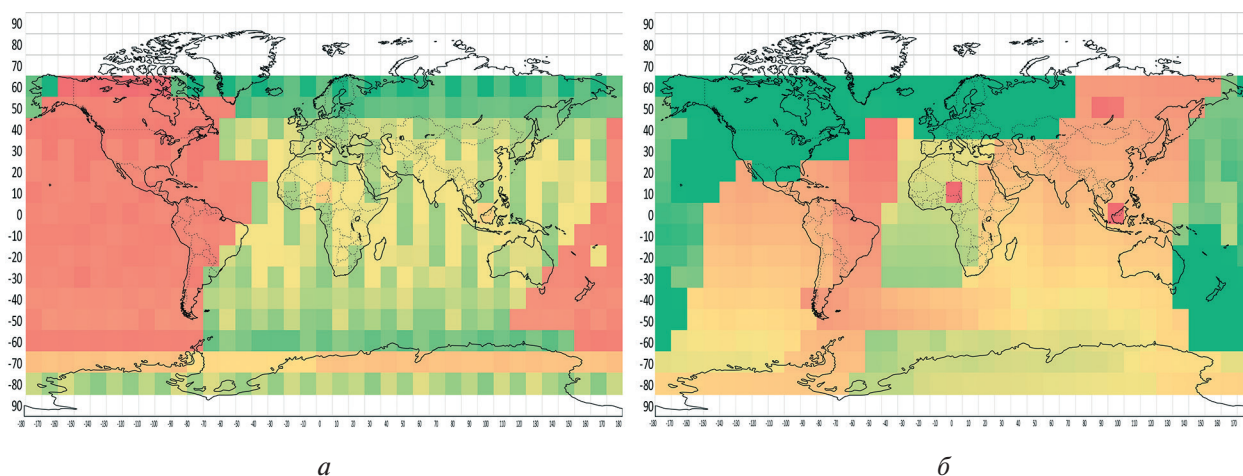


Рис. 2. Тепловые карты периодичности (*а*) и оперативности (*б*) доставки информации группировки Planet

На *рис. 3, 4* (см. с. 107) представлены тепловые карты периодичности и оперативности для двух предложенных вариантов группировок.

Из рисунков видно, что варианты 1 и 2 удовлетворяют критерию глобальности обзора поверхности Земли за одни сутки полёта. Вариант 1 (см. *рис. 3а*) позволяет наблюдать практически всю территорию Евразии и Северной Америки со средним временем повторного посещения, не превышающим 385 мин. Вариант 2 (см. *рис. 4а*) позволяет наблюдать территорию Евразии и Северной и Южной Америки со средним временем повторного посещения, не превышающим 410 мин. При этом в обоих вариантах, задействуя наземные пункты, расположенные на территории Евразии, удаётся достигнуть средней оперативности доставки информации 50–60 мин (см. *рис. 4*).

Результаты расчёта показателей эффективности приведены в *табл. 4*.

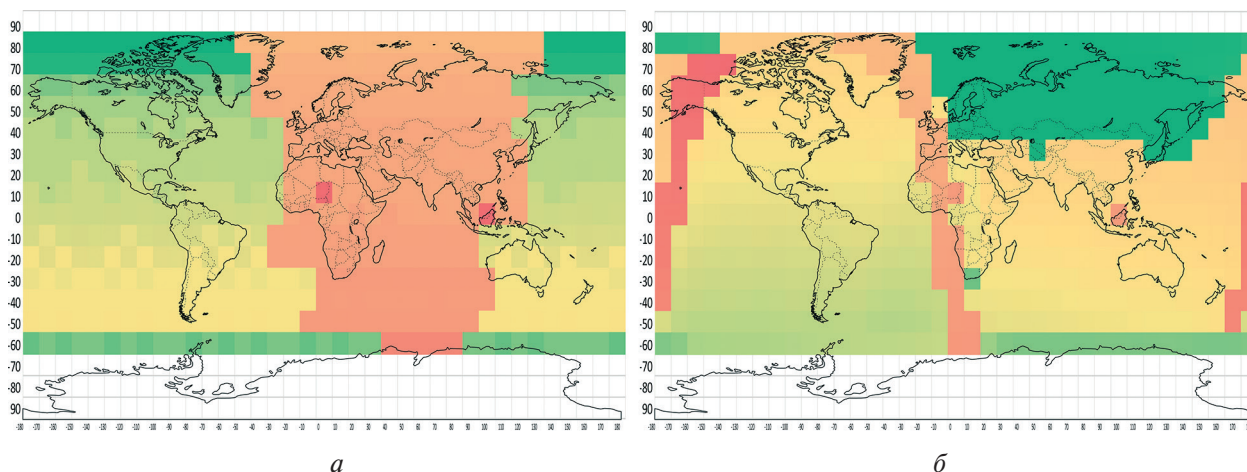


Рис. 3. Тепловые карты периодичности (а) и оперативности (б) доставки информации группировки варианта 1

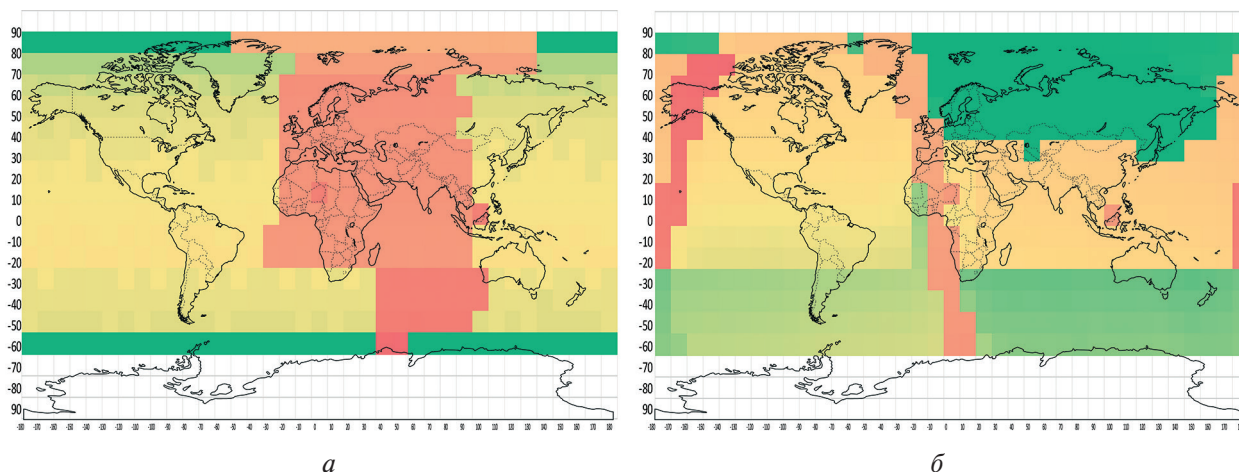


Рис. 4. Тепловые карты периодичности (а) и оперативности (б) доставки информации группировки варианта 2

Таблица 4. Результаты расчёта показателей эффективности

Показатель эффективности	Planet	Вариант 1	Вариант 2
Максимальная периодичность, мин	1358,22	1383,03	1669,2
Максимальная оперативность, мин	86,07	60,60	190,0
Средняя периодичность, мин	460,50	381,50	405,2
Средняя оперативность, мин	35,40	53,94	60,6
Доля отснятой площади земной поверхности за одни сутки, %	78,90	78,9	78,9

В табл. 4 представлены максимальные и средние значения показателей оперативности и периодичности и доли покрытия Земли трёх рассматриваемых многоспутниковых космических систем. Как видно из табл. 4, эти системы демонстрируют одинаковую долю покрытия Земли. Такие результаты вызваны тем, что в моделируемых космических системах не используются КА, располагающиеся на полярных орбитах. Включение такой орбиты в орбитальную структуру позволит увеличить долю покрытия, однако возрастёт вероятность столкновений в приполярном регионе. Стоит отметить, что данные результаты получены в процессе моделирования одних суток функционирования космических систем, для получения более точных

показателей средней периодичности и оперативности следует проводить моделирование большей продолжительности времени функционирования. Однако достигнутых результатов должно быть достаточно для предварительной оценки эффективности существующих космических систем, а также систем, которые находятся в стадии проектирования.

Заключение

Рассмотрены вопросы проектирования современных многоспутниковых космических систем дистанционного зондирования Земли. Проанализирован состав многоспутниковой группировки компании Planet. Исследованы модели для оценки эффективности мультиспектральных космических систем наблюдения. Предложена комплексная модель оценки эффективности многоспутниковых космических систем ДЗЗ. В состав разработанной модели входят модель оценки охвата космических аппаратов, модели оценки работоспособности и периодичности наблюдения. В статье предлагается использовать ряд ограничений при выполнении имитационного моделирования на задержку: между захватом двух последовательных объектов; перед захватом после передачи данных; перед отправкой данных после захвата; между съёмкой одного и того же объекта; между передачей данных. Показано, что использование таких ограничений позволяет в процессе имитационного моделирования проводить настройку системы, моделировать различные сценарии работы бортовой аппаратуры, что, в свою очередь, позволяет получить результаты, приближённые к реальным. Проведено моделирование трёх космических систем, обеспечивающих глобальный мониторинг земной поверхности с периодом повторного посещения не менее одного раза в сутки.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках госзадания (проект FSSS-2023-0007).

Литература

1. Можжаев Г. В. Задача о непрерывном обзоре Земли и кинематически правильные спутниковые системы. I // Космич. исслед. 1972. Т. 10. Вып. 6. С. 833–840.
2. Можжаев Г. В. Задача о непрерывном обзоре Земли и кинематически правильные спутниковые системы. II // Космич. исслед. 1973. Т. 11. Вып. 1. С. 59–69.
3. Можжаев Г. В. Синтез орбитальных структур спутниковых систем (теоретико-групповой подход). М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
4. Boshuizen C. R., Mason J., Klupar P., Spanhake S. Results from the Planet Labs Flock Constellation // Proc. 28th Annual AIAA/USU Conf. Small Satellites. 2014. SSC14-I-1.
5. Colton K., Klofas B. Supporting the Flock: Building a Ground Station Network for Autonomy and Reliability // Proc. 30th Annual AIAA/USU Conf. Small Satellites. 2016. SSC16-IX-05.
6. d'Angelo P., Kuschek G., Reinartz P. Evaluation of Skybox video and still image products // Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. ISPRS Technical Commission I Symp. 17–20 Nov. 2014, Denver, Colorado, USA. 2014. V. 40. No. 1. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-95-2014>.
7. Easton R. L., Brescia R. Continuous visible satellite constellations. Reports 6896 / National Research Laboratory. Washington DC, 1969. 45 p.
8. Gobetz F. W. Satellite networks for global coverage // J. Astronautical Sciences. 1961. V. 8. No. 4. P. 114.
9. Ivanushkin M., Tkachenko I., Krestina A. Design methodology for a multi-satellite global continuous observation system of the Earth // 8th Intern. Conf. Information Technology and Nanotechnology (ITNT 2022). 2022. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848609.
10. Iylyev N., Evdokimova V., Podlipnov V. et al. First Earth-Imaging CubeSat with Harmonic Diffractive Lens // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 9. Article 2230. <https://doi.org/10.3390/rs14092230>.
11. Luders R. D. Satellite networks for continuous zonal coverage // American Rocket Society J. 1961. V. 31. No. 2. P. 179–184.
12. Marshall W., Boshuizen C. Planet Labs' Remote Sensing Satellite System // Proc. 27th Annual AIAA/USU Conf. Small Satellites. 2013. SSC13-WK-15.
13. Ullock M. H., Shoen A. H. Optimum Polar Satellite Networks for Continuous Earth Coverage // American Institute of Aeronautics and Astronautics J. 1963. V. 1. P. 69–72. <https://doi.org/10.2514/3.1471>.

14. Vargo L. G. Orbital patterns for satellite systems // J. Astronautical Sciences. 1960. V. 7. No. 4. P. 78–86.
15. Walker J. G. Circular Orbit Patterns Providing Continuous Whole Earth Coverage. Technical Report 70211 / Royal Aircraft Establishment. Farnborough, England, 1970. 45 p.
16. Walker J. G. Some Circular Orbit Patterns Providing Continuous Whole Earth Coverage // J. British Interplanetary Society. 1971. V. 24. No. 11. P. 369–384.
17. Walker J. G. Satellite constellations // J. British Interplanetary Society. 1984. V. 37. No. 12. P. 559.

Efficiency assessment of multi-satellite Earth remote sensing space systems

M. A. Ivanushkin^{1,2}, I. S. Tkachenko¹

¹ Samara National Research University, Samara 443086, Russia

² Image Processing Systems Institute RAS —
Branch of Federal Scientific Research Centre

“Crystallography and Photonics” RAS, Samara 443001, Russia

E-mail: ivanushkin.ma@ssau.ru

This article considers multi-satellite Earth remote sensing space systems that provide global coverage. The aim of the study is to provide a comprehensive model for assessing the effectiveness of multi-satellite Earth remote sensing space systems. Firstly, the structure of the Planet multi-satellite system was analysed by considering the design issues of modern multi-satellite Earth remote sensing space systems. Secondly, models for estimating coverage, models for assessing operability and periodicity were considered and a number of constraints for performing simulations were proposed. Using such constraints in the process of simulation modelling makes it possible to adapt the system and simulate different scenarios of operating the on-board equipment, which in turn makes it possible to obtain results close to the real ones. Finally, a comprehensive model for assessing the performance of multi-satellite Earth remote sensing space systems has been proposed. As a result, modelling and performance assessment of three space systems providing a global view of the Earth’s surface with a revisit time for each point at least once per day was carried out.

Keywords: small spacecraft, remote sensing space system, multi-satellite system

Accepted: 14.08.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-101-110

References

1. Mozhaev G. V., The problem of a continuous survey of the Earth and kinematically correct satellite systems, *Cosmic Research*, 1972, Vol. 10, No. 6, pp. 833–839 (in Russian).
2. Mozhaev G. V., The problem of a continuous survey of the Earth and kinematically correct satellite systems, *Cosmic Research*, 1973, Vol. 11, No. 1, pp. 59–69 (in Russian).
3. Mozhaev G. V., *Sintez orbital’nykh struktur sputnikovyykh sistem (teoretiko-gruppovoi podkhod)* (The synthesis of the orbital structures of satellite systems (group-theoretic approach)), Moscow: Mashinostroenie, 1989, 304 p. (in Russian).
4. Boshuizen C. R., Mason J., Klupar P., Spanhake S., Results from the Planet Labs Flock Constellation, *Proc. 28th Annual AIAA/USU Conf. Small Satellites*, 2014, SSC14-I-1.
5. Colton K., Klofas B., Supporting the Flock: Building a Ground Station Network for Autonomy and Reliability, *Proc. 30th Annual AIAA/USU Conf. Small Satellites*, 2016, SSC16-IX-05.
6. d’Angelo P., Kusch G., Reinartz P., Evaluation of Skybox video and still image products, *Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Technical Commission I Symp.*, 17–20 Nov. 2014, Denver, Colorado, USA, 2014, Vol. 40, No. 1, <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-95-2014>.

7. Easton R. L., Brescia R., Continuous visible satellite constellations, *National Research Laboratory, Reports 6896*, Washington DC, 1969, 45 p.
8. Gobetz F. W., Satellite networks for global coverage, *J. Astronautical Sciences*, 1961, Vol. 8, No. 4, p. 114.
9. Ivanushkin M., Tkachenko I., Krestina A., Design methodology for a multi-satellite global continuous observation system of the Earth, *8th Intern. Conf. Information Technology and Nanotechnology (ITNT 2022)*, 2022, DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848609.
10. Ivliev N., Evdokimova V., Podlipnov V. et al., First Earth-Imaging CubeSat with Harmonic Diffractive Lens, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 9, Article 2230, <https://doi.org/10.3390/rs14092230>.
11. Luders R. D., Satellite networks for continuous zonal coverage, *American Rocket Society J.*, 1961, Vol. 31, No. 2, pp 179–184.
12. Marshall W., Boshuizen C., Planet Labs' Remote Sensing Satellite System, *Proc. 27th Annual AIAA/USU Conf. Small Satellites*, 2013, SSC13-WK-15.
13. Ullock M. H., Shoen A. H., Optimum Polar Satellite Networks for Continuous Earth Coverage, *American Institute of Aeronautics and Astronautics J.*, 1963, Vol. 1, pp. 69–72, <https://doi.org/10.2514/3.1471>.
14. Vargo L. G., Orbital patterns for satellite systems, *J. Astronautical Sciences*, 1960, Vol. 7, No. 4, pp. 78–86.
15. Walker J. G., Circular Orbit Patterns Providing Continuous Whole Earth Coverage, *Royal Aircraft Establishment, Technical Report 70211*, Farnborough, England, 1970, 45 p.
16. Walker J. G., Some Circular Orbit Patterns Providing Continuous Whole Earth Coverage, *J. British Interplanetary Society*, 1971, Vol. 24, No. 11, pp. 369–384.
17. Walker J. G., Satellite constellations, *J. British Interplanetary Society*, 1984, Vol. 37, No. 12, p. 559.