УДК 629.78.076.6

Уточнение характеристик землеобзора кластера малых космических аппаратов для обеспечения баллистической доступности информации о заданных районах

Refinement of the characteristics of the Earth survey of a cluster of small spacecraft to ensure the ballistic availability of information about specified areas

Житников / Zhitnikov T.
Тимофей Андреевич
(vka@mil.ru)
кандидат технических наук.
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского»
(ВКА им.а А. Ф. Можайского) МО РФ,
начальник лаборатории 12 отдела военного института (научно-исследовательского).
г. Санкт-Петербург

Кокшаров / Koksharov S.
Сергей Николаевич
(vka@mil.ru)
кандидат военных наук.
ВКА им. А. Ф. Можайского,
старший преподаватель кафедры оперативного искусства и тактики.
г. Санкт-Петербург

Кульвиц / Kulvits A.
Алексей Владимирович
(vka@mil.ru)
кандидат технических наук, доцент.
ВКА им. А. Ф. Можайского,
докторант кафедры навигационно-баллистического обеспечения применения космических средств и теории полета летательных аппаратов.
г. Санкт-Петербург

Михеев / Mikheev O.
Олег Юрьевич
(vka@mil.ru)
кандидат военных наук, доцент.
ВКА им. А. Ф. Можайского,
доцент кафедры оперативного искусства и тактики.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: малый космический аппарат – small spacecraft; баллистическая структура – ballistic structure; кластер – cluster; характеристики землеобзора – earth survey characteristics

В статье рассматриваются прикладные аспекты по моделированию характеристик землеобзора кластера малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Предложен термин «баллистическая доступность информации при функционировании кластера малых космических аппаратов». Исследуется влияние баллистической структуры кластера малых космических аппаратов на баллистическую доступность информации при решении задачи радиомониторинга заданной поверхности Земли.

The article discusses the applied aspects of modeling the characteristics of the Earth survey cluster of small spacecraft remote sensing of the Earth. The term ballistic availability of information in the operation of a cluster of small spacecraft is proposed. The influence of the ballistic structure of a cluster of small spacecraft on the ballistic availability of information when solving the problem of radio monitoring of a given surface of the Earth is investigated.

Введение

В настоящее время для решения задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) активно применяются космические системы, состоящие из кластеров малых космических аппаратов (МКА) [1–3]. Под кластером МКА понимается совокупность МКА различного целевого назначения, предназначенных для совместного выполнения общей целевой задачи и воспринимаемых потребителем как единое целое [1].

На этапах баллистического проектирования космических систем (КС) МКА ДЗЗ при выборе и обосновании параметров орбит и баллистической структуры требуется оценивать характеристики решения функциональных задач, которые в основном зависят от параметров и условий функционирования бортовой аппаратуры МКА.

Характеристики землеобзора космических систем дистанционного зондирования Земли

В настоящее время при проектировании КС ДЗЗ используются так называемые характеристики землеобзора. Обычно предполагают, что бортовая аппара-

тура обеспечивает обзор части пространства, ограниченной поверхностью кругового конуса с углом полураствора γ равным углу обзора бортовой аппаратуры (рис. 1).

В этом случае на поверхности земли получают круговую зону обзора, размеры которой характеризуются геоцентрическим углом $\varphi_з$. Геоцентрический угол зоны обзора $\varphi_з$ зависит от радиуса орбиты МКА r и угла обзора бортовой аппаратуры [4]:

$$\varphi_з = \frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{r}{R}\sin\gamma\right) - \gamma$$

$$\text{или } \varphi_з = \arcsin\left(\frac{r}{R}\sin\gamma\right) - \gamma .$$

При движении МКА по орбите зона обзора перемещается по поверхности Земли так, что центр зоны обзора совпадает с подспутниковой точкой. Геометрическое место мгновенных зон обзора называют полосой обзора, представлено на рисунке 2. Границами полосы обзора являются огибающие мгновенных зон обзора.

При выполнении различных видов дистанционных наблюдений системой космического мониторинга излучение объектов поверхности Земли регистрируется с использованием различных методов и различной по принципу работы съемочной аппаратурой. По технологии получения специальной информации системы ДЗЗ космического базирования подразделяются на фотографические, оптико-электронные и радиоэлектронные системы, работающие в оптическом, инфракрасном, тепловом, микроволновом и радиодиапазонах [5].

В рамках каждой технологии получения изображения можно выделить кадровые, сканирующие и синтезирующие системы. Бортовая аппаратура таких систем реализует различные типы съемок:

– съемка объектов небольших размеров (объектовая съемка);

– съемка протяженного объекта (маршрутная съемка);

– съемка большой площади (площадки) на разных витках полета (площадная съемка);

– съемка большой площадки на одном витке полета;

– мозаичная съемка.

При этом бортовая аппаратура, обеспечивающая проведение тех или иных видов съемки и реализующая различные схемы сканирования Земли обладает уникальными параметрами и ограничениями. Например, максимальная ширина полосы захвата, максимальное отклонение от надира в боковом направлении от трассы и вдоль движения КА, время перенацеливания и др.

Обычно детальное моделирование целевого функционирования МКА ДЗЗ требуется в процессе баллистического проектирования КС МКА ДЗЗ, в ходе которого происходит постоянные уточнения и изменения их проектных характеристик [3]. Изменение проектных характеристик бортовой аппаратуры в процессе разработки может приводить к изменению энергобаланса на борту МКА, влиять на программу

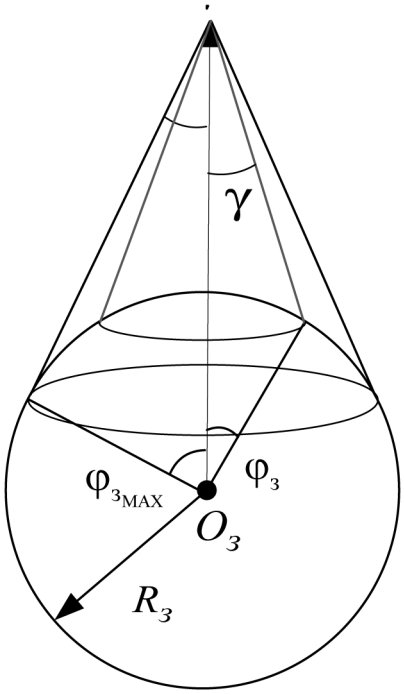


Рис. 1. Зона обзора

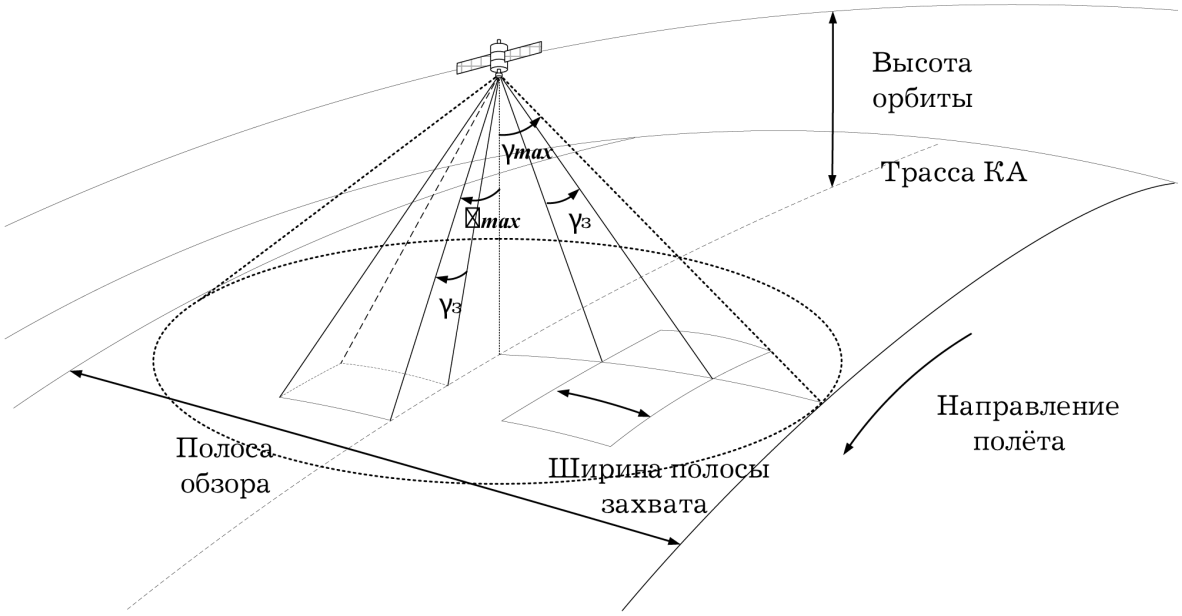


Рис. 2. Геометрические характеристики полосы обзора МКА ДЗЗ

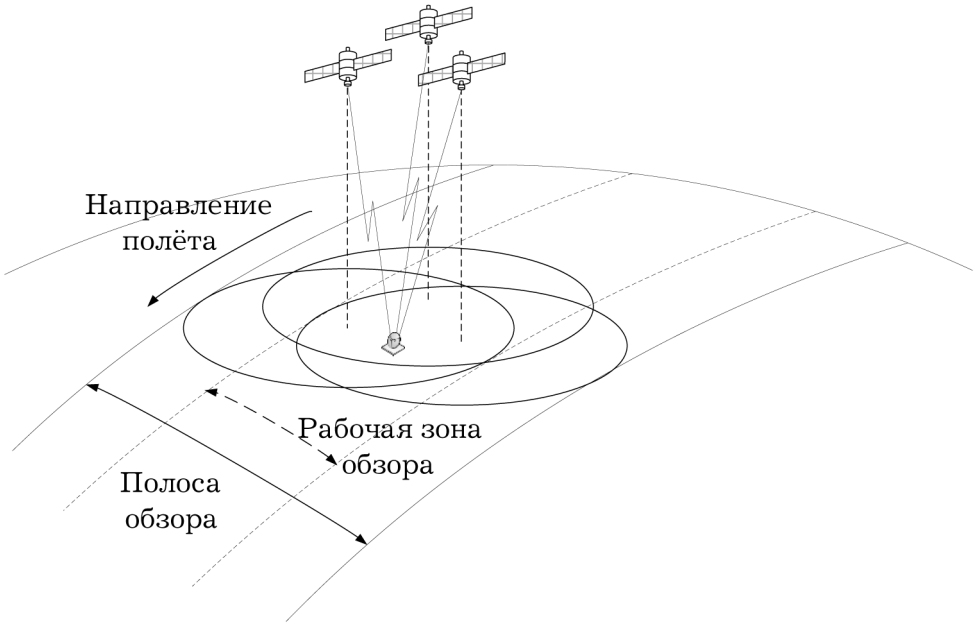


Рис. 3. Геометрические характеристики полосы обзора кластера МКА

работы бортовой аппаратуры и, соответственно, на выполнение требований по отдельным параметрам функционирования КА по целевому назначению. При этом синтез баллистической структуры КС МКА ДЗЗ происходит параллельно с учетом текущих характеристик и ограничений функционирования бортовой аппаратуры.

КС ДЗЗ, состоящие из кластеров МКА, реализуют различные принципы стереосъемок, синтезированной апертуры, разнесенной радиолокационной системы и т.п. Так например, при решении задач радио-, радиолокационного и радиотехнического мониторинга поверхности Земли с применением кластеров МКА, реализуются разные методы местоопределения источников радиоизлучений и объектов, такие как [6]:

– разностно-дальномерный;
– суммарно-дальномерный;
– доплеровский и др.

Геометрия обзора подобной КС ДЗЗ в общем виде представлена на рисунке 4. В данном случае ограничениями выступают базовые расстояния между МКА в составе кластера, площадь совместной (рабочей) зоны обзора, погрешность определения моментов прихода сигнала, синхронизация бортовых часов МКА и др.

Таким образом, для нахождения оптимальных параметров орбит КС ДЗЗ, состоящих из кластеров МКА требуется проводить уточнение характеристик землеобзора. Уточненные характеристики должны учитывать особенности методов проведения измерений (съемки), а также особенности и ограничения функционирования бортовой аппаратуры.

Уточнение характеристик зоны обзора кластера малых космических аппаратов при решении задачи радиомониторинга поверхности Земли

В качестве примера рассмотрим модель зоны обзора КС радиомониторинга поверхности Земли, использующей разностно-дальномерный метод местоопределения источников радиоизлучения (ИРИ). Для реализации данного метода необходимо, чтобы кластер состоял из трех МКА [4]. Геометрическая модель движения совместной зоны обзора трех МКА, под которой будем понимать область пространства, внутри которого возможна реализация разностно-дальномерного метода определения местоположения ИРИ объектов на поверхности Земли в произвольный момент времени, представлена на рисунке 4.

В данном случае обобщенная характеристика должна учитывать динамику пространственно-точностных характеристик обзора в произвольный момент времени при движении кластера МКА по орбите.

При реализации разностно-дальномерного метода пространственно-точностные характеристики кластера МКА находятся в обратной зависимости, так улучшение одного показателя ведет к ухудшению другого.

В качестве примера рассмотрим случай, когда три МКА в составе кластера располагаются на круговых наклонных орбитах, причем МКА-1 и МКА-2 лежат в одной плоскости. В качестве исходных данных для моделирования примем радиус орбиты всех МКА 7000 км, наклонение плоскости орбиты 63 градуса.

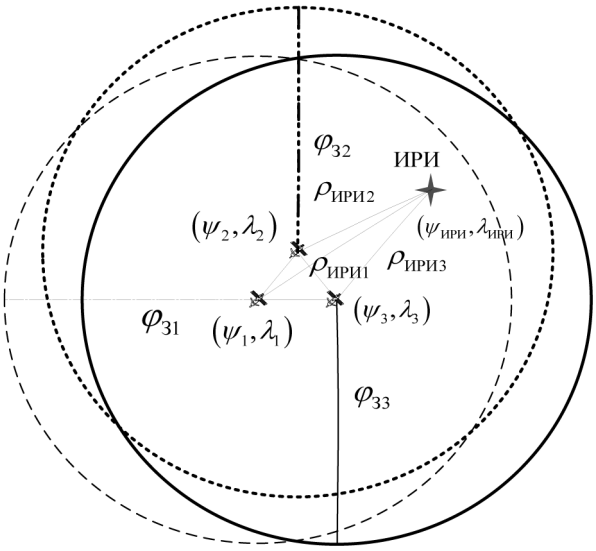


Рис. 4. Проекция зоны обзора кластера МКА на поверхности Земли

Баллистическая структура и пространственно-точностные характеристики кластера МКА представлены в таблице 1.

В таблице представлены параметры относительной площади зоны обзора трех МКА ($S_{отн}$), коэффициент геометрии ($K_г$), относительные расстояния между МКА в составе кластера ($d_{i,j}$). Данные характеристики соответствуют начальному положению, далее при движении кластера МКА они будут изменяться. На рисунке 5 представлены проекции зоны обзора кластера МКА для различных вариантов баллистических структур. Как видно из рисунка 5, чем меньше относительное расстояние между МКА $d_{i,j}$, тем больше относительная площадь обзора и тем хуже точность местоопределения $K_г$.

Проведем моделирование движения кластера МКА на интервале одного витка и оценим изменение пространственных и точностных характеристик. Характер изменения указанных параметров представлен на рисунках 6–7.

Каждый из вариантов баллистической структуры кластера МКА с точки зрения обеспечения требуемой точности определения координат ИРИ объекта и требуемых пространственных характеристик обзора можно оценить при помощи следующего показателя:

$$J = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} F_{1i}(K_Г)F_{2i}(S_{отн}). \quad (1)$$

$F_{1i}(K_Г)$ – коэффициент, характеризующий точность местоопределения ИРИ и рассчитываемый по следующей формуле:

$$F_{1i}(K_Г) = \begin{cases} 1, \text{ если } K_Г \le K_{Г зад}, \\ 0, \text{ если } K_Г > K_{Г зад}. \end{cases} \quad (2)$$

$K_г$ – значение пространственного геометрического фактора кластера МКА на поверхности Земли в зоне обзора кластера.

$n = \frac{t}{h}$, где h – шаг интегрирования.

$F_{2i}(S_{отн})$ – коэффициент, характеризующий площадь зоны обзора кластера МКА, рассчитываемый по следующей формуле:

$$F_{2i}(S_{отн}) = \begin{cases} 1, \text{ если } S_{отн} \le S_{отн зад}, \\ 0, \text{ если } S_{отн} > S_{отн зад}. \end{cases} \quad (3)$$

$S_{отн}$ – относительная площадь зоны обзора кластера, рассчитываемая по формуле:

$$S_{отн} = \frac{1}{m}\sum_{i=0}^{m} D_i, \quad (4)$$

где m – количество секторов разбиения предельно возможной зоны обзора кластера;

D_i – индикатор попадания в зону обзора кластера:

$$D_i = \begin{cases} 1, \rho_{ири\,j}(t) \le \varphi_{з\,j}, \; j = 1(1)\ldots 3; \\ 0, \rho_{ири\,j}(t) > \varphi_{з\,j}, \; j = 1(1)\ldots 3, \end{cases} \quad (5)$$

Таким образом, каждый вариант баллистической структуры может быть оценен с помощью показателя (1), максимальное значение которого обеспечивает выбор оптимального варианта.

Для оценки качества функционирования кластера МКА введем понятие «баллистическая доступность информации».

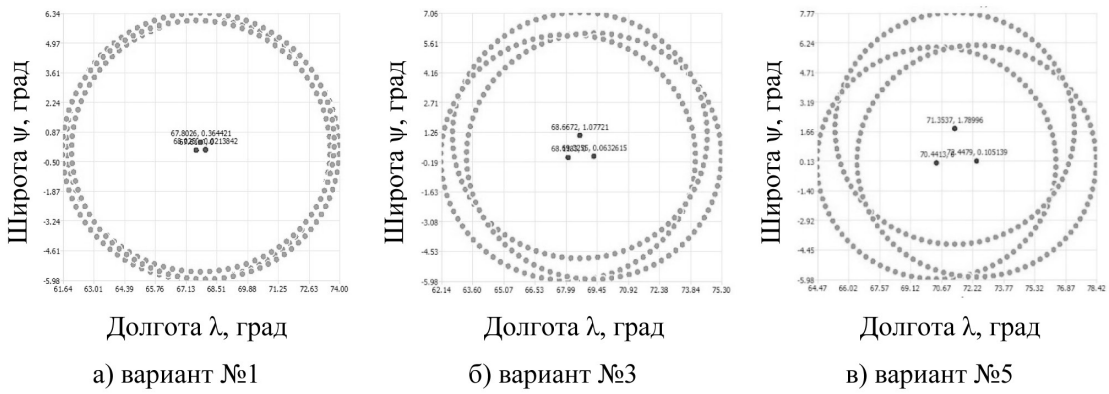
Под баллистической доступностью информации будем понимать обеспечение требуемых пространственно-точностных характеристик обзора кластером МКА заданной поверхности Земли.

Данное понятие и показатель (1) позволяют сделать вывод о том, удовлетворяет ли потребителя качество обзора или необходима дополнительная коррекция кластера МКА при оценке его функционирования.

Таблица 1

Пространственно-точностные характеристики кластера МКА для различных вариантов баллистических структур

Номер баллистической структуры	u_2, град	Ω_2, град	u_3, град	Ω_3, град	Δd_{12}, км	Δd_{13}, км	Δd_{23}, км	$S_{отн}$	$K_г$
1	0,409	0	0,024	0,398	50	50	50	0,93	20,6
2	0,809	0	0,048	0,787	99	99	99	0,87	10,5
3	1,209	0	0,071	1,175	148	148	148	0,81	7,1
4	1,609	0	0,095	1,564	197	197	197	0,76	5,4
5	2,009	0	0,118	1,953	245	245	245	0,69	4,4



а) вариант №1 б) вариант №3 в) вариант №5

Рис. 5. Относительное положение МКА в составе кластера в начальный момент времени

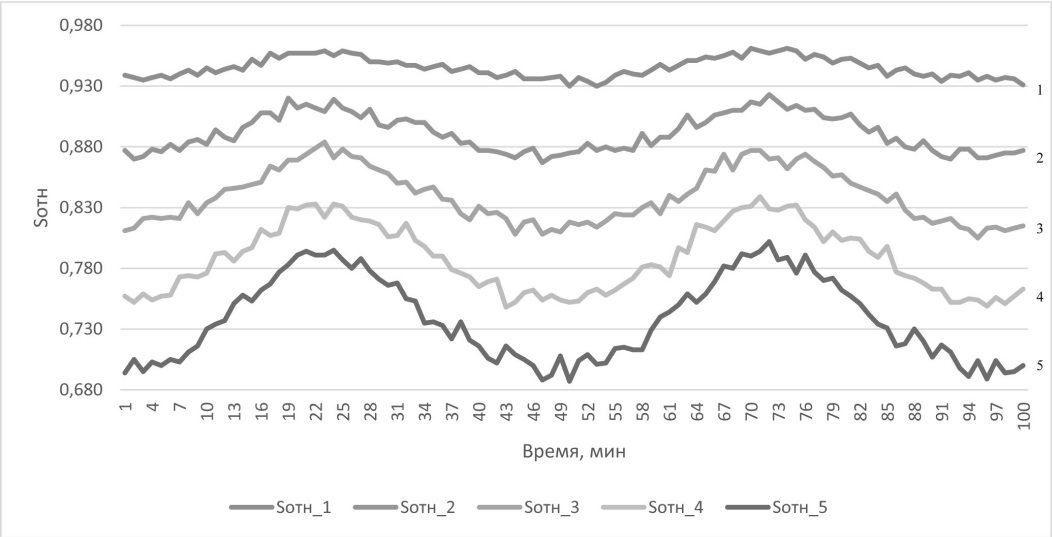


Рис. 6. Зависимость относительной площади зоны обзора кластера МКА от времени

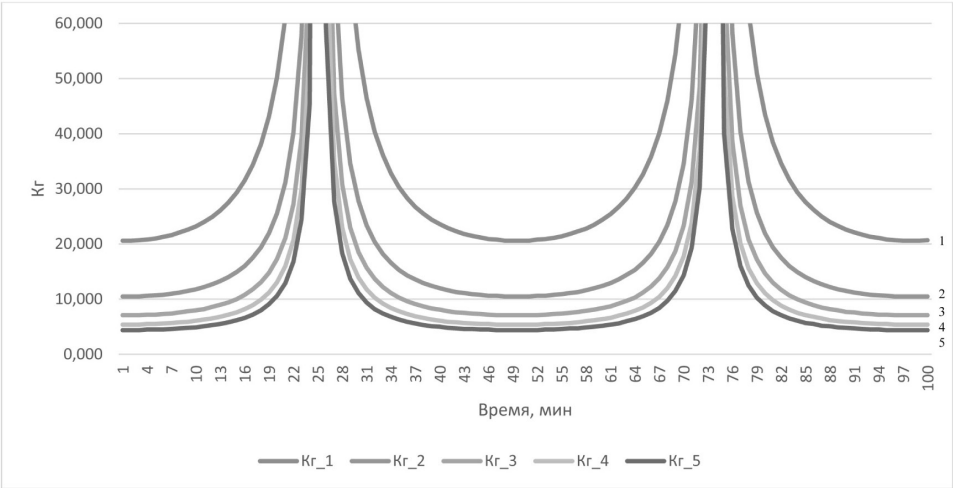


Рис. 7. Зависимость точностных характеристик Кг кластера МКА от времени

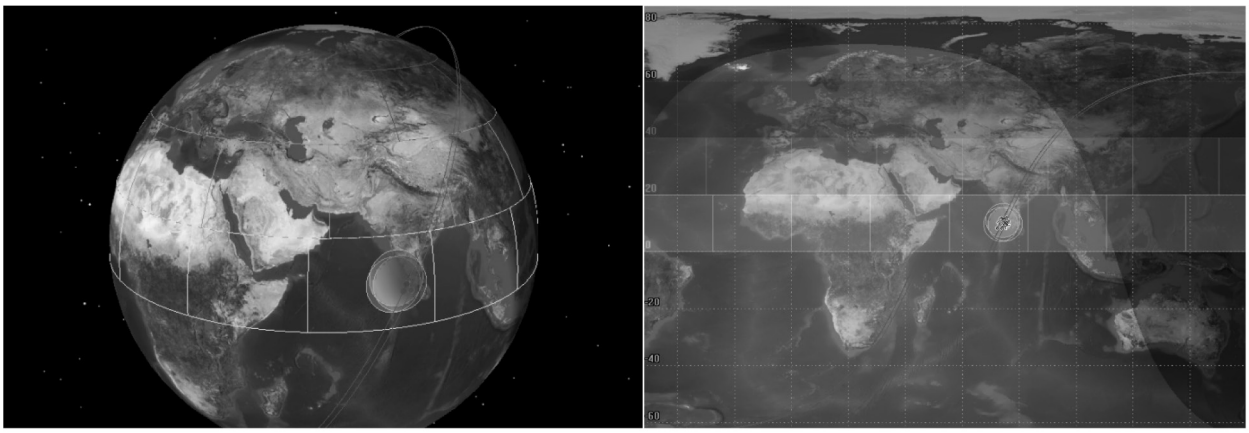
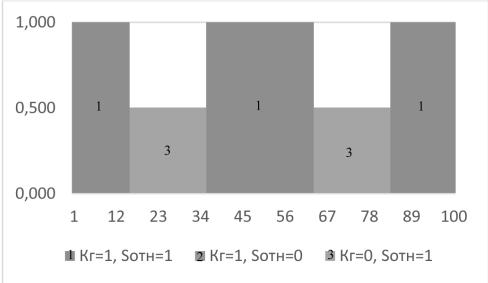


Рис. 8. Моделирование движения кластера МКА для расчета баллистической доступности по широтам

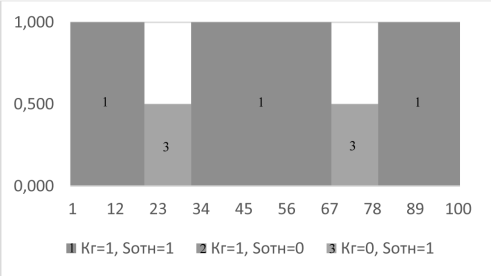
Таблица 2

Значения показателя результативности функционирования кластера МКА

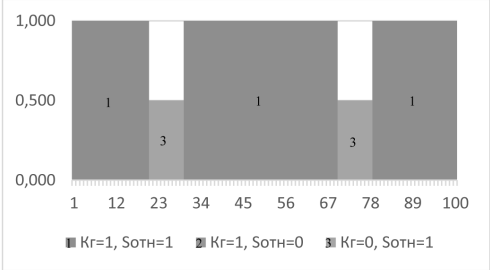
Номер баллистической структуры	$K_{г\ треб}$=10, $S_{треб}$=0,9	$K_{г\ треб}$=10, $S_{треб}$=0,8	$K_{г\ треб}$=10, $S_{треб}$=0,7	$K_{г\ треб}$=15, $S_{треб}$=0,7	$K_{г\ треб}$=20, $S_{треб}$=0,7
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0,6	0,72
3	0	0,58	0,58	0,76	0,82
4	0	0,1	0,72	0,82	0,86
5	0	0	0,65	0,67	0,73



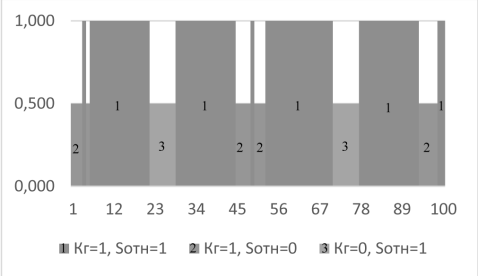
а) вариант №2 – J=0.6



в) вариант №3 – J=0.76

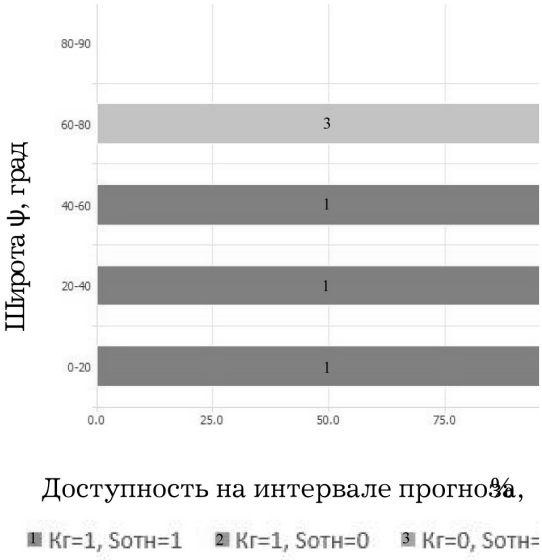


г) вариант №4 – J=0,82

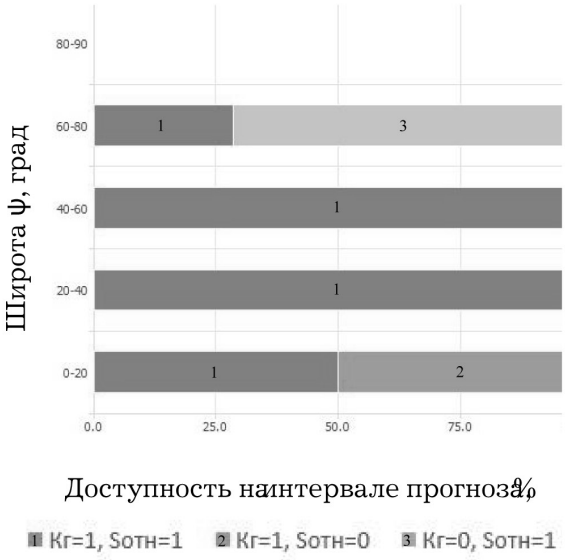


б) вариант №5 – J=0.67

Рис. 9. Зависимость баллистической доступности информации от времени для различных вариантов баллистических структур кластера МКА



а) вариант №3



б) вариант №5

Рис. 10. Зависимость баллистической доступности информации по широтам для различных вариантов баллистических структур кластера МКА

Оценка баллистической доступности информации кластера МКА при решении задачи радиомониторинга поверхности Земли

В качестве исходных данных для оценки баллистической доступности информации кластера МКА примем параметры орбит и баллистическую структуру, приведенную в таблице 1. В качестве ограничений обозначим требуемый коэффициент геометрии ($K_{г\ треб}$), а требуемую относительную площадь совместной зоны обзора МКА – ($S_{треб}$). Таким образом, баллистическая структура кластера МКА на интервале времени активного функционирования должна обеспечивать точность определения местоположения ИРИ с коэффициентом геометрии $K_г$ не превышающим требуемый ($K_Г \le K_{ГТРЕБ}$) и при этом относительная площадь обзора $S_{отн}$ должна быть не менее заданной ($S_{ОТН} \ge S_{ТРЕБ}$). Визуализация процесса моделирования функционирования кластера МКА представлена на рисунке 8.

Процесс моделирования основывается на расчете пространственно-точностных характеристик функционирования кластера МКА для различных участков поверхности Земли (широт). Данная задача возникает на этапе баллистического проектирования, когда происходит обоснование оптимальной баллистической структуры кластера МКА, которая обеспечит конкретные требования (или достижение наилучших параметров из возможных).

Значение показателя (1) для различных вариантов баллистических структур кластера МКА при заданных ограничениях $K_{г\ треб}$ и $S_{треб}$ представлены в таблице 2.

Проведя анализ результатов моделирования, представленный в таблице 2, можно сделать вывод о том, что при «ужесточении» требований к пространственно-точностным характеристикам обзора значения показателя существенно уменьшаются. Так, наибольшим значением показателя обладает баллистическая структура кластера № 4 (J = 0,86). Таким образом, кластер МКА (баллистическая структура № 4) только 86% времени функционирования удовлетворяет всем пространственно-точностным требованиям и 14% не удовлетворяет хотя бы по одному из них (в данном случае 14% времени она не удовлетворяет ограничениям по $K_г$).

Зависимость баллистической доступности информации от времени для различных вариантов баллистических структур кластера МКА при $K_{г\ треб}$=15 и $S_{треб}$=0,7 представлена на рисунке 9.

Зависимость баллистической доступности по широтам для различных вариантов баллистических структур кластера МКА представлена на рисунке 10.

Из рисунка 10 видно, что для варианта № 3 баллистическая доступность на широтах 60–80 градусов не соответствует требованиям. Это происходит из-за того, что при приближении к точке вертекса (наивысшей точки трассы полета МКА) пространственное расположение МКА в составе кластера не позволяет реализовывать разностно-дальномерный метод, поэтому точность определения низкая. Для решения данной проблемы необходимо корректировать баллистическую структура кластера МКА или использовать эллиптические орбиты [7].

Для варианта № 5 доступность в общем составляет 73%. На широтах 60–80 градусов 70% просмотренной поверхности Земли не обеспечиваются требования по точности, а на широтах 0–20 градусов на 50% – не обеспечиваются требуемые площадные характеристики.

Выводы

Таким образом, на этапах баллистического проектирования КС ДЗЗ, состоящих из кластеров МКА, необходимо проводить анализ и уточнение характеристик землеобзора. Проводя анализ и оценивая таким образом баллистическую доступность на интервале активного функционирования кластера МКА, можно сделать вывод о качестве решения задачи радиомониторинга для заданных участков поверхности Земли. Новизна подхода состоит в том, что при оптимизации баллистической структуры кластера МКА появляется возможность учитывать новые ограничения и особенности функционирования бортовой аппаратуры.

Литература

1. Потюпкин, А. Ю. Кластеры малоразмерных космических аппаратов как новый тип космических объектов / А.Ю. Потюпкин, Н.С. Данилин, А.С. Селиванов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2017. – Т. 4, Вып. 4. – С. 45–56.

2. Клюшников, В. Ю. Построение кластеров малых космических аппаратов / В.Ю. Клюшников // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 6. – С. 423–428.

3. Куренков, В. И. Моделирование целевого функционирования космических аппаратов наблюдения с учетом энергобаланса : учебное пособие / В.И. Куренков, В.В. Салмин, Б.А. Абрамов. – Самара : Издательство Самарского государственного аэрокосмического университета, 2007. – 160 с.

4. Аверкиев, Н. Ф. Оценка результативности функционирования баллистически связанной группы космических аппаратов при решении задачи определения местоположения источника радиоизлучения разностно-дальномерным методом / Н.Ф. Аверкиев, Т.А. Житников, В.Ю. Клюшников // Космонавтика и ракетостроение. – 2020. – № 6 (117). – С. 49–56.

5. Клименко, Н. Н. Современные низкоорбитальные космические аппараты для геолокации и идентификации источников радиоизлучения / Н.Н. Клименко // Воздушно-космическая сфера. – 2018. – № 2 (95). – С. 48–57.

6. Аверкиев, Н. Ф. Анализ функциональных аспектов применения баллистически связанной группы космических аппаратов при решении задачи определения местоположения источника радиоизлучения / Н.Ф. Аверкиев, Т.А. Житников, А.В. Кульвиц // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды XXIII Всероссийской научно-практической конференции РАРАН (Санкт-Петербург, 1–4 апреля 2020 г.). – Т. 3. – Санкт-Петербург : НПО специальных материалов, 2020. – С. 214–218.

7. Кульвиц, А. В. Прикладные аспекты коррекции кластера малых космических аппаратов / А.В. Кульвиц, Н.Ф. Аверкиев, В.Ю. Клюшников // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. – 2022. – Вып. № 3 (57). – С. 11–19.