

УДК: 520.88

DOI: 10.53816/20753608_2024_1_58

**ОБОСНОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
РАЗНОРОДНОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ
МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

**SUBSTANTIATION OF THE INDICATOR OF THE EFFECTIVENESS
OF THE FUNCTIONING OF A HETEROGENEOUS ORBITAL GROUPING
OF SMALL SPACECRAFT FOR REMOTE SENSING OF THE EARTH**

По представлению академика РАН В.А. Петрова

А.Ю. Коваленко, А.В. Кульвиц, Р.А. Винокуров, И.Ю. Нечаев

ВКА им. А.Ф. Можайского

A.Y. Kovalenko, A.V. Kulvits, R.A. Vinokurov, I.Y. Nechaev

В статье рассматриваются вопросы обоснования показателя эффективности функционирования разнородной орбитальной группировки малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (ОГ МКА ДЗЗ) с позиций системного подхода. Предложен подход по формированию разнородной ОГ МКА ДЗЗ, состоящей из МКА различного типа наблюдения. Представлены результаты моделирования функционирования разнородной ОГ МКА ДЗЗ, проведен анализ влияния баллистической структуры на целевой эффект.

Ключевые слова: наблюдение, разнородная орбитальная группировка, малый космический аппарат, системный подход, показатель эффективности.

The article discusses the issues of substantiation of the indicator of the effectiveness of the functioning of a heterogeneous orbital grouping of small Earth remote sensing spacecraft (OG MKA remote sensing) from the standpoint of a systematic approach. An approach is proposed for the formation of a heterogeneous OG of a remote sensing system consisting of an IC of various types of observation. The results of modeling the functioning of a heterogeneous remote sensing system are presented; the analysis of the influence of the ballistic structure on the target effect is carried out.

Keywords: observation, heterogeneous orbital grouping, small spacecraft, systematic approach, efficiency indicator.

Введение

Создание интегрированных космических информационно-телекоммуникационных систем — очередной шаг в развитии космонавтики, который невозможен без поддержания и совершенствования эффективной космической инфраструктуры. В этой связи особую актуальность

приобретает проблема создания так называемых разнородных орбитальных группировок малых космических аппаратов (ОГ МКА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), имеющих в своем составе МКА различного типа наблюдения (радиотехнического, радиолокационного и оптико-электронного) [1–4]. Формирование разнородной ОГ МКА ДЗЗ имеющих различные типы

бортовой аппаратуры позволяет с позиции комплексирования целевых возможностей во взаимодействии с существующими и перспективными космическими системами связи и ретрансляции повысить эффективность информационного обеспечения.

Основным параметром, влияющим на эффективность функционирования разнородной ОГ МКА ДЗЗ, является ее баллистическая структура [5]. Таким образом, для решения задачи по выбору и обоснованию оптимальной баллистической структуры, необходимо использовать показатель, который позволяет учитывать комплексирование целевых возможностей различных типов бортовой специальной аппаратуры, обладающих разными характеристиками наблюдения и принципами решения целевых задач.

Обоснование показателя эффективности функционирования разнородной орбитальной группировки малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли

Анализ этапов функционирования разнородной ОГ МКА ДЗЗ позволяет сделать вывод, что одним из ключевых этапов является получение информации об объектах на поверхности Земли. Процесс функционирования разнородной ОГ МКА ДЗЗ сопровождается элементами случайности. Исход планируемого действия, даже организованного строго определенным образом, не может быть точно предсказан, будет случайным. Поэтому в качестве показателей эффективности принимаются, как правило, неслучайные характеристики случайной величины.

Эффективностью разнородной ОГ МКА ДЗЗ является ожидаемая мера достижения поставленной перед ними в ходе применения цели. При этом показатели эффективности выступают в качестве ее численной меры, а критерии эффективности — как совокупность условий, определяющих пригодность, оптимальность или превосходство результатов, оцениваемых действий с точки зрения поставленной в них цели [6]. Исходя из анализа задач, возлагаемых на ОГ МКА ДЗЗ, целью ее функционирования является получение информационных данных с поверхности Земли и передача их потребителю. Из

множества свойств, присущих процессу наблюдения (обзора), существенными являются операционные свойства, определяемые эффектами его результатов:

- результативность наблюдения $\Xi(u)$;
- ресурсозатраты на применение МКА $R(u)$;
- оперативность наблюдения $T(u)$.

Качество решения задач наблюдения ОГ МКА ДЗЗ разведки может быть оценено только всей совокупностью перечисленных операционных свойств с помощью векторного показателя [7, 8]:

$$Y(u) = Y[\Xi(u), R(u), T(u)].$$

Типичной является ситуация, когда на характеристики, параметры, условия функционирования ОГ МКА ДЗЗ в ходе наблюдения воздействует совокупность случайных факторов. Как следствие, комплексной характеристикой качества такого целенаправленного процесса может служить только вероятность W достижения цели операции (наблюдения), в частности вероятность обнаружения объекта наблюдения в заданном районе за заданный интервал времени с учетом ограничений на ресурсозатраты (количество задействованных МКА в составе однотипной ОГ, при ограничении расхода операционного ресурса). Данный показатель является безразмерным и выражает степень соответствия реального результата операции требуемому или потенциально возможному результату для заданных стратегий и условий.

Таким образом, обобщенный показатель эффективности наблюдения районов обслуживания ОГ МКА ДЗЗ W — это вероятность получения пригодной информации об объекте в заданном районе за заданный интервал времени ограниченным составом МКА [3], определяемая по формуле полной вероятности [9]

$$W = \sum_{k=0}^{2^N-1} P(H_k) \cdot P(A/H_k), \quad (1)$$

при следующих условиях и ограничениях

$$t_{уст} \leq t^{зад}, N_{КА} = N_{КА}^{дост}, R_o \leq R_o^{дост},$$

где A — событие, состоящее в том, что по данным наблюдения достигнут целевой эффект применения ОГ МКА ДЗЗ;

H_k — событие, состоящее в том, что k -я комбинация ОГ МКА ДЗЗ наблюдения выполнила задачу наблюдения;

N — число баллистических структур (типов МКА ДЗЗ), входящих в разнородную ОГ;

$t_{уст}$ — время устаревания информации;

$t^{зад}$ — заданное время;

$N_{КА}$ — количество МКА в разнородной ОГ МКА ДЗЗ;

$N_{КА}^{дост}$ — доступное количество МКА ДЗЗ;

R_o — операционный ресурс;

$R_o^{дост}$ — доступный операционный ресурс.

Вероятность $P(H_k)$ соответствует вероятности выполнения целевой задачи оптико-электронными, радиолокационными или радиотехническими ОГ МКА

$$P(H_k) = 1 - \prod_{i \in \{i_k\}} (1 - P_{обн}^{(i)}), \quad k = 0(1) \dots 2^N - 1,$$

где i — индекс соответствующей баллистической структуры (космической системы), входящей в разнородную ОГ;

k — индекс варианта комбинации баллистических структур, в составе разнородной ОГ;

$\{i_k\}$ — множество индексов баллистических структур входящих в k -й вариант комбинации;

$P_{обн}^{(i)}$ — вероятность выполнения задачи наблюдения i -й ОГ. Условная вероятность $P(A/H_k)$ из формулы (1) определяется следующим образом [9]:

– если $H_k = 0$, т.е. целевую задачу наблюдения не выполнила ни одна ОГ, то

$$P(A/H_k) = 0;$$

– если $H_k = H^{(i)}$, т.е. целевую задачу наблюдения выполнила только i -я ОГ, то

$$P(A/H_k) = v_i p_{Ti};$$

– если $H_k = H^{(ij)}$, т.е. целевую задачу наблюдения выполнила i -я и j -я ОГ, то

$$P(A/H_k) = v_i p_{Ti} + v_j p_{Tj} - v_i v_j p_{Ti} p_{Tj}.$$

Таким образом, если, например, все (три) ОГ в составе разнородной ОГ МКА ДЗЗ выполнили задачу наблюдения, то условная вероятность будет определять следующим образом [3]:

$$P(A/H_k) = \sum_{i=1}^3 v_i p_{Ti} - \sum_{i < j} v_i v_j p_{Ti} p_{Tj} + \prod_{i=1}^3 v_i p_{Ti},$$

где v_i — функциональная значимость данных наблюдения i -й ОГ;

p_{Ti} — вероятность того, что время наблюдения i -й ОГ заданного района не меньше заданного.

Модель наблюдения заданных районов обслуживания

Решение задачи оценивания эффективности наблюдения районов обслуживания предполагает необходимость математического описания границ соответствующих районов. Данная задача сводится к построению уравнения, соответствующего заданному геометрическому объекту, и базируется на использовании аппарата R -функций [10, 11].

Вероятность обнаружения объекта заключается в наступлении события попадания объекта в мгновенную зону обзора КА. Данный показатель имеет геометрический смысл, определяющий процент площади района, просмотренной КА. Расчет вероятности обнаружения объекта базируется на прогнозировании просмотра заданных районов обслуживания. Для прогнозирования просмотра необходимо решить задачу математического описания полосы (мгновенной зоны) обзора МКА (рис. 1). Наблюдаемая часть поверхности Земли за заданное время описывается соответствующим булевым выражением, где D_1 и D_2 — мгновенные зоны обзора

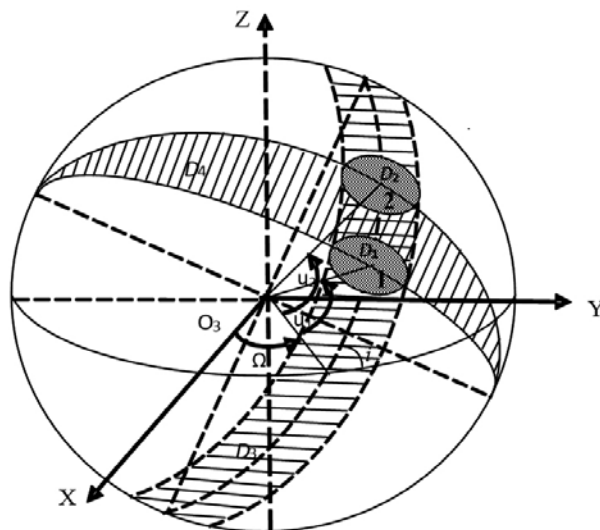


Рис. 1. Проекция зоны обзора МКА на земной шар

в соответствующие моменты времени; D_3 — пояс, соответствующий геоцентральному углу обзора, а D_4 — соответствующий сектор (рис. 1)

$$D = (D_1 \vee D_2) \vee (D_3 \wedge D_4).$$

На основании уравнений элементарных областей формируется уравнение обзораемой области на поверхности Земли при движении МКА за заданное время, которое с учетом изменения оскулирующих элементов орбиты во времени является динамическим уравнением трассы полета вместе с полосой обзора, которое вместе с уравнением района позволяет сформировать выражение, характеризующее непросмотренную часть района

$$r = R \wedge \bar{\Phi}(t) = R - \Phi(t) - |R + \Phi(t)|,$$

где R — уравнение района;

$\Phi(t)$ — динамическое уравнение обзораемой области.

$$P(H) = 1 - \frac{\iint_D r d\psi d\lambda}{\iint_D R d\psi d\lambda},$$

где r — радиус-вектор орбиты МКА;

ψ — геоцентрическая широта;

λ — геоцентрическая долгота.

Для всестороннего оценивания эффективности наблюдения районов обслуживания разнородной ОГ МКА ДЗЗ наряду с показателем эффективности наблюдения районов обслуживания (основным показателем эффективности) необходимо использовать некоторые параметры, характеризующие различные стороны и особенности проведения операции, так называемые частные (дополнительные) показатели эффективности. Основной и дополнительные показатели эффективности составляют систему показателей эффективности [7, 8].

Моделирование и расчет показателя эффективности функционирования ОГ МКА ДЗЗ

Рассмотрим пример расчета обобщенного показателя эффективности для различных вариантов баллистических структур разнородной ОГ МКА ДЗЗ.

Пусть имеется две ОГ МКА ДЗЗ ограниченного состава, функционирующие на разных орбитах и обладающих различными типами и характеристиками бортовой аппаратуры. Обозначим первую и вторую ОГ МКА ДЗЗ соответственно: ОГ МКА-1 и ОГ МКА-2.

К основным параметрам и характеристикам данных ОГ относят следующие:

1. Параметры, характеризующие орбиты МКА;
2. Баллистическая структура каждой ОГ МКА ДЗЗ;
3. Характеристики землеобзора и районов обслуживания (табл. 1);
4. Время разрыва в наблюдении (периодичность обзора).

Необходимо определить такое расположение ОГ МКА-1 относительно ОГ МКА-2, которое обеспечивало бы экстремум целевой функции при наблюдении заданных районов обслуживания при их совместном использовании. В качестве целевой функции используется вероятность достижения цели наблюдения W .

Решение задачи формирования вариантов баллистических структур разнородной ОГ МКА ДЗЗ решается путем перебора всех возможных вариантов орбитального построения ОГ. Для каждого орбитального построения рассчитывается значение показателя эффективности, на основании которого выбирается баллистическая структура разнородной ОГ МКА, обеспечивающая максимум данного показателя [11–13]. Для определения оптимального расположения МКА в составе ОГ МКА при решении задачи наблюдения при их

Таблица 1

Географические координаты границ районов обслуживания

Район обслуживания	Северная граница	Южная граница	Западная граница	Восточная граница
Район № 1	45°	35°	30°	45°
Район № 2	40°	35°	33°	38°
Район № 3	45°	30°	0°	30°
Район № 4	38°	30°	350°	360°

совместном функционировании необходимо перебрать все возможные варианты построения этих группировок и оценить эффективность решения целевой задачи наблюдения [11, 14]. Таким образом, формируется баллистическая структура разнородной ОГ МКА ДЗЗ путем сдвига баллистической структуры ОГ МКА-1 относительно баллистической структуры ОГ МКА-2 по прямому восхождению восходящего узла и по аргументу широты МКА. Наибольшее значение обобщенного показателя эффективности наблюдения районов наблюдения ОГ МКА ДЗЗ W для рассмотренного случая достигается при сдвигах по прямому восхождению восходящего узла $\Delta\Omega = 87^\circ$ и аргументу широты МКА $\Delta u = 17^\circ$.

В табл. 2 представлены значения частных показателей эффективности наблюдения райо-

нов обслуживания разнородной ОГ КА на интервале цикла повторяемости трассы полета.

Расчет значений обобщенного показателя эффективности наблюдения районов обслуживания ОГ КА разведки производился на интервале времени 4 и 6 часов, сравнительные результаты расчетов представлены в табл. 3 и 4 соответственно. На рис. 2 представлена динамика изменения эффективности наблюдения районов обслуживания для различных значений интервала времени устаревания информации на примере района № 1.

Анализ полученных результатов, представленных в табл. 3, 4 и рис. 2, показывает увеличение эффективности наблюдения районов обслуживания при использовании разнородной ОГ МКА ДЗЗ в среднем на 19–23 %.

Таблица 2

Результаты наблюдения районов обслуживания разнородной ОГ МКА

Район обслуживания	Максимальное время разрыва наблюдения	Кратность наблюдения в сутки	Математическое ожидание времени разрыва наблюдения	Математическое ожидание времени наблюдения, с
Район № 1	03:26:30	41	00:34:18	315,0
Район № 2	01:18:30	72	00:45:45	344,3
Район № 3	01:27:00	55	00:23:05	359,7
Район № 4	01:28:59	38	00:34:53	308,9

Таблица 3

Вероятность достижения цели наблюдения на интервале времени в 4 часа

Район обслуживания	Состав ОГ				
	ОГ МКА-1	ОГ МКА-2	ОГ МКА-1, ОГ МКА-2	ОГ МКА-1, ОГ МКА-2, (сдвиг по $\Delta\Omega$)	ОГ МКА-1, ОГ МКА-2, (сдвиг по $\Delta\Omega$ и Δu)
Район № 1	-	0,28	0,28	0,308	0,338
Район № 2	0,188	0,427	0,534	0,587	0,645
Район № 3	0,305	0,427	0,611	0,672	0,739
Район № 4	0,321	—	0,642	0,706	0,776

Таблица 4

Вероятность достижения цели наблюдения на интервале времени в 6 часов

Район обслуживания	Состав ОГ				
	ОГ МКА-1	ОГ МКА-2	ОГ МКА-1, ОГ МКА-2	ОГ МКА-1, ОГ МКА-2, (сдвиг по $\Delta\Omega$)	ОГ МКА-1, ОГ МКА-2, (сдвиг по $\Delta\Omega$ и Δu)
Район № 1	0,24	0,28	0,539	0,593	0,652
Район № 2	0,28	0,428	0,749	0,824	0,906
Район № 3	0,378	0,379	0,846	0,931	0,989
Район № 4	0,403	0,9	0,962	0,999	0,999

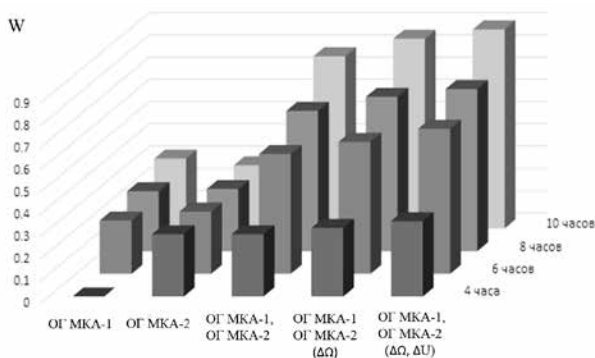


Рис. 2. Результаты наблюдения района № 2

Вывод

Таким образом, предложенный подход по использованию показателя эффективности функционирования разнородной ОГ МКА ДЗЗ позволяет обосновывать баллистическую структуру ОГ, обладающую разными характеристиками и режимами наблюдения бортовой аппаратуры и тем самым осуществлять комплексирование целевых возможностей разнотипных МКА. Полученные результаты и их анализ демонстрируют возможность решения комплексной оптимизационной задачи, направленной на проектирование эффективно функционирующей космической системы, и определяют требования к составу средств системы, их характеристикам, качеству, способам применения.

Литература

1. Романов А.А., Черкас С.В. Перспективы развития космических войск Российской Федерации в условиях современных тенденций военно-космической деятельности // Военная мысль. 2020. № 9. С. 35–45.
2. Коваленко А.Ю. Баллистическое проектирование разнородной системы КА с заданным циклом замыкания трассы // Труды СПИИРАН. 2015. № 3 (40). С. 45–54.
3. Коваленко А.Ю. Математические аспекты оценивания результативности применения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды СПИИРАН. 2017. № 4 (53) С. 29–50.
4. Клименко Н.Н. Современные низкоорбитальные космические аппараты для геолокации и идентификации источников радиоиз-

лучения // Воздушно-космическая сфера. 2018. № 2 (95). С. 48–57.

5. Кульвиц А.В., Власов С.А., Коваленко А.Ю., Мосин Д.А. Методика обоснования структуры системы космических аппаратов комбинированного состава // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия машиностроение. 2022. № 1(140). С. 24–39.

6. Вопросы повышения эффективности целевого применения космических средств: учебное пособие; [под общ. ред. Ю.С. Мануйлова]. М.: МО РФ. 2001. 180 с.

7. Надёжность и эффективность в технике: Справочник в 10-ти т. / Ред. совет: В.С. Авдеевский (пред.) и др. Эффективность технических систем; [под общ. ред. В.Ф. Уткина, Ю.В. Крюкова]. М.: Машиностроение, 1988, Т. 3. 328 с.

8. Куренков В.И. Методы исследования эффективности ракетно-космических систем. Методические вопросы [Электронный ресурс] // Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т). Самара, 2012. 201 с.

9. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. М.: Издательский центр «Академия», 2003. 576 с.

10. Волков В.Ф., Кульвиц А.В., Коваленко А.Ю., Салухов В.И. Прикладные аспекты оптимизации орбитальных структур спутниковых систем за счет уточнения параметров орбитального движения // Труды СПИИРАН. Том 19. № 4. 2020. С. 719–745.

11. Лебедев А.А., Нестеренко О.П. Космические системы наблюдения: Синтез и моделирование. М.: Машиностроение, 1991. 224 с.

12. Лысенко Л.Н., Бетанов В.В., Звягин Ф.В. Теоретические основы баллистико-навигационного обеспечения космических полетов; [под общ. ред. Л.Н. Лысенко]. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 520 с.

13. Малышев В.В., Красильщиков М.Н., Бобронников В.Т. [и др.]. Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез и управление; [под ред. В.В. Малышева]. М.: Изд-во МАИ, 2000. 568 с.

14. Хартов В.В., Ефанов В.В., Занин К.А. Основы проектирования орбитальных оптико-электронных комплексов: учебное пособие. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2011 132 с.