

## МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОРБИТАЛЬНЫХ СИСТЕМ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ

П.А. Проценко

prosvka@gmail.com

Р.В. Хуббиев

hubbiev.ruslan@gmail.com

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

---

### Аннотация

Проведен анализ и выявлены недостатки существующих подходов к оцениванию эффективности целевого применения орбитальных систем малых космических аппаратов оптико-электронного наблюдения. Выполнено моделирование применения орбитальной системы, необходимой для обеспечения гарантированного обзора поверхности Земли на различных широтах с учетом времени восхода и заката в дни зимнего и летнего солнцестояния, и выявлена низкая чувствительность показателей — среднесуточного числа наблюдений объекта на заданной широте и наибольшего разрыва времени между наблюдениями объекта на заданной широте. Предложен новый показатель эффективности, отражающий длительность разрыва времени наблюдения объекта с доверительной вероятностью, и разработана методика, которая расширяет научно-методический аппарат по оцениванию эффективности применения орбитальных систем малых космических аппаратов оптико-электронного наблюдения. Получены зависимости разрывов времени наблюдения объекта на заданной широте от вероятности возникновения данных разрывов. Методику рекомендуется использовать для оценивания эффективности совместного применения нескольких орбитальных систем малых космических аппаратов оптико-электронного наблюдения и систем неполного состава, а также для постановки и решения задачи синтеза баллистической структуры орбитальной системы, создаваемой в целях повышения эффективности обзора поверхности Земли

### Ключевые слова

*Эффективность, разрыв времени наблюдения объекта, оптико-электронное наблюдение, орбитальная система, малые космические аппараты*

Поступила 11.04.2019

Принята 30.05.2019

© Авторы, 2020

**Введение.** Орбитальная система (ОС) космических аппаратов (КА) обзорной поверхности Земли предназначена для информационного обеспечения решения широкого спектра задач в интересах различных сфер деятельности государства [1, 2]. Основную часть ОС землеобзора составляют системы КА с оптико-электронной целевой аппаратурой на борту, которые обеспечивают получение детальных изображений объектов, расположенных в любой точке на поверхности Земли, акватории Мирового океана и околоземного пространства.

Бурное развитие информационных технологий, достижения в энергетике и производстве новых материалов позволили существенно улучшить массогабаритные и энергетические характеристики специальных и обеспечивающих систем, используемых на борту КА оптико-электронного наблюдения (ОЭН). В результате появились малые и сверхмалые КА, которые не только дешевле по стоимости изготовления больших КА, но и значительно превосходят их по ряду показателей [3, 4]. Развитие больших КА идет по пути реализации максимальных характеристик по всем основным потребительским параметрам (разрешение, число спектральных каналов, производительность, точность) одновременно. Для малых КА (МКА) ОЭН производители стараются максимизировать значение одного или нескольких параметров, имеющих существенное значение для качественного решения требуемой задачи [5].

Указанные преимущества МКА позволяют вместо дорогостоящих систем КА, состоящих из одного-трех больших КА, создавать многоспутниковые системы МКА, способные функционировать в рамках скоординированных программ по единому замыслу.

Однако достижение целей применения космических систем на основе МКА невозможно без использования новых подходов при разработке и реализации их основных компонент: ОС КА, системы развертывания и восполнения ОС, системы управления ОС, наземного специального комплекса, а также совершенствования и развития научно-методического аппарата в области оценивания эффективности функционирования указанных систем.

**Анализ существующего подхода к оцениванию эффективности применения ОС МКА ОЭН и принятые допущения.** В настоящее время эффективность использования ОС МКА ОЭН оценивается двумя показателями [6, 7]:

– среднесуточным числом наблюдений любого объекта на заданной широте (показатель является усредненным и характеризует частоту наблюдений заданной широты земной поверхности);

– наибольшим разрывом времени между наблюдениями объекта на заданной широте.

Наблюдение объектов с использованием МКА ОЭН требует наличия освещенности наблюдаемого объекта, поэтому съемка объектов ведется только в светлое время суток [8, 9]. Продолжительность светового дня зависит от широты, на которой планируется проводить съемку. Время восхода и заката для различных широт в дни зимнего и летнего солнцестояния приведено в табл. 1, из которой следует, что выбор широтных поясов и времени съемки в значительной степени определяет интервал, на котором ее можно провести. Для съемки широтного пояса 0–50° приемлемым является интервал времени от 8 до 16 ч. Для того чтобы ОС МКА с оптико-электронной целевой аппаратурой на борту могла эффективно наблюдать заданную территорию круглогодично, необходимо сформировать баллистическую структуру ОС МКА ОЭН на солнечно-синхронных орбитах, учитывая время прохождения восходящего узла от 8 до 16 ч.

Таблица 1

**Время восхода и заката в дни солнцестояния**

Широта, град	День летнего солнцестояния			День зимнего солнцестояния		
	Восход	Закат	Длительность дня	Восход	Закат	Длительность дня
0	5:50	17:50	12:00	5:50	17:50	12:00
40	4:33	19:23	14:50	7:20	16:30	9:10
50	3:53	19:53	16:00	7:59	15:59	8:00
60	2:43	21:04	18:21	9:00	14:39	5:39

Анализируя тактико-технические характеристики оптико-электронной аппаратуры МКА обзора поверхности Земли, выявили, что КА следует размещать на высотах ~ 500 км, чтобы обеспечить разрешение съемки ~ 10 м. Для оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций применяется КА «Канопус-В» [10–12] с высотой орбиты (510 ± 10) км и разрешением съемки 2,1 м в панхроматическом и 10,5 м в многозональном режимах.

Для гарантированного обеспечения обзора любой точки поверхности Земли за интервал времени не более суток необходимо, чтобы межвитковый уход плоскости орбиты МКА был меньше суммарной полосы обзора КА, расположенных на этой орбите. Число КА ОЭН, необходимых для

размещения на одной орбите, определяется как отношение межвиткового ухода орбиты к суммарной ширине полосы обзора КА ОЭН.

Для решения задачи гарантированного обзора один раз в сутки любого объекта на поверхности Земли требуется ОС МКА ОЭН со следующими параметрами: 9 МКА в плоскости; наклонение  $97,5^\circ$ ; местное время прохождения восходящего узла 8 ч; высота орбиты 500 км; эксцентриситет равный нулю; угол полураствора бортовой аппаратуры  $15^\circ$ .

Данная система имеет суммарную полосу обзора 2700 км. При этом межвитковое расстояние составляет 2484 км, что приводит к частичному перекрытию зон обзора соседних МКА. Система, состоящая из меньшего числа МКА, будет иметь суммарную полосу обзора меньше межвиткового расстояния и тем самым не позволит обеспечить гарантированное наблюдение объектов с указанной периодичностью. Такие системы МКА будут иметь непостоянный разрыв наблюдения [13].

Для оценки показателей эффективности применения ОС МКА ОЭН для наблюдения за объектами на различных широтах выполнено моделирование ОС, состоящей из 9, 8 и 7 МКА. По результатам моделирования рассчитаны значения приведенных ранее показателей (табл. 2).

Таблица 2

**Результаты оценивания эффективности применения ОС МКА ОЭН**

Показатели использования ОС МКА ОЭН	Номер системы МКА / Число МКА								
	1 / 9			2 / 8			3 / 7		
Широта наблюдаемого объекта, град	0	30	50	0	30	50	0	30	50
Среднесуточное число наблюдений, раз/сут	1,1	1,3	1,7	0,96	0,99	1,5	0,89	0,96	1,3
Наибольший разрыв времени, ч	12	14	16	24	28	16	24	28	16

Из данных табл. 2 следует, что вторая и третья системы МКА не различаются по показателю наибольшего разрыва в наблюдении, что свидетельствует о низкой чувствительности к входным данным расчета значений показателей.

Отметим, что среднесуточное число наблюдений объекта повышается с увеличением его широты. Это связано с тем, что с ростом значения широты, на которой расположен объект, ширина полосы обзора становится больше, что приводит к наложению соседних зон обзора МКА. В итоге число наблюдений в сутки растет. Значение наибольшего разрыва

времени наблюдения также увеличивается с ростом значения широты в связи с увеличением продолжительности темного времени суток. Наглядно данный факт приведен на рис. 1, где показан фрагмент моделирования применения ОС, состоящей из семи МКА.



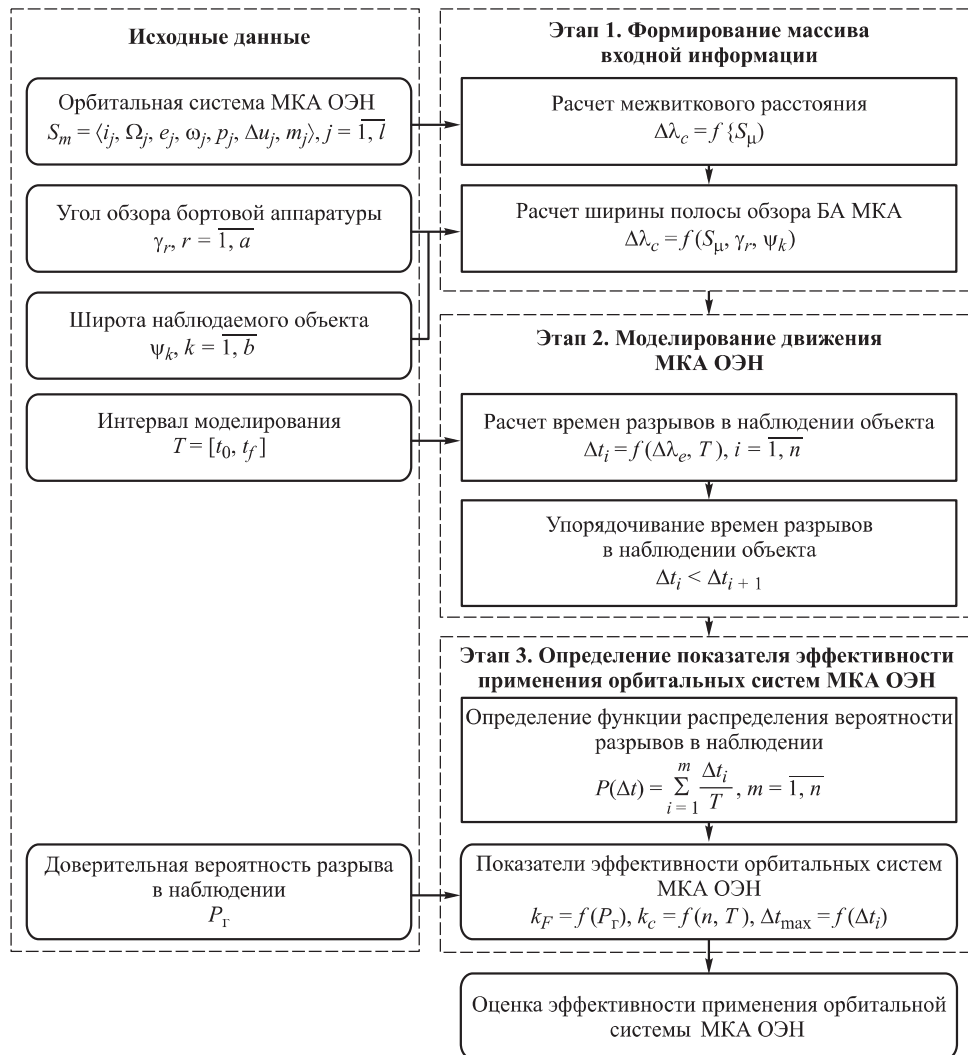
**Рис. 1.** Полосы обзора МКА ОЭН:

1 — трасса КА; 2 — ширина полосы обзора КА; 3 — разрыв времени в наблюдении объекта

#### Методика оценивания эффективности применения ОС МКА ОЭН.

На рис. 2 приведена структура методики оценивания эффективности применения ОС МКА ОЭН. На первом этапе формируется массив входной информации. Для расчета времени разрыва в наблюдении объекта необходимо вычислить межвитковое расстояние и ширину полосы обзора бортовой аппаратуры (БА) МКА ОЭН.

Исходные данные для расчета следующие:  $S_\mu$  — орбитальная система, которая характеризуется баллистической структурой конструктивного вида  $S_\mu = \langle i_j, \Omega_j, e_j, \omega_j, p_j, \Delta u_j, m_j \rangle$ , где  $j$  — номер плоскости в  $\mu$ -й системе,  $j = \overline{1, l}$ ,  $l$  — число плоскостей в системе;  $i_j$  — наклонение орбиты КА ОЭН в  $j$ -й плоскости;  $\Omega_j$  — прямое восхождение восходящего узла орбиты в  $j$ -й плоскости;  $e_j$  — эксцентриситет орбиты КА ОЭН в  $j$ -й плоскости;  $\omega_j$  — аргумент широты перигея в  $j$ -й плоскости;  $p_j$  — фокальный параметр орбиты КА ОЭН в  $j$ -й плоскости;  $\Delta u_j$  — геоцентрический угол между соседними КА ОЭН в  $j$ -й плоскости;  $m_j$  — число КА ОЭН, расположенных в  $j$ -й плоскости и разнесенных равномерно по аргументу широты;  $\gamma_r, r = \overline{1, a}$  — угол обзора специальной БА МКА ОЭН;  $\psi_k, k = \overline{1, b}$  — широта наблюдаемого объекта, расположенная на поверхности Земли.



**Рис. 2.** Структура методики оценивания эффективности применения ОС МКА ОЭН

Для второго этапа входные данные — это интервал моделирования  $T = [t_0, t_f]$ ; ОС МКА ОЭН за интервал времени  $T$  производит  $n$  наблюдений заданного объекта с некоторыми разрывами в наблюдении  $\Delta t_i$ , где  $i = \overline{1, n}$ . Разрывы времени наблюдения объекта упорядочиваются по правилу  $\Delta t_i < \Delta t_{i+1}$ . На третьем этапе формируется показатель эффективности применения ОС МКА ОЭН. Пренебрегая длительностью времени наблюдения, получаем, что сумма всех разрывов времени наблюдения объекта соответствует длительности интервала  $T$ :  $\sum_{i=1}^n \Delta t_i = T$ .

Случайному моменту времени из интервала  $t_m \in T$  соответствует разрыв в наблюдении  $\Delta t_m$ , при этом вероятность попадания случайного момента времени в интервал  $\Delta t_m$  прямо пропорциональна длительности  $\Delta t_m$  [10]:

$$P_m = \frac{\Delta t_m}{T}, \quad m = \overline{1, n}.$$

Сумма всех вероятностей попадания случайного момента времени в тот или иной интервал равна единице.

При известных вероятностях попадания случайного момента времени в некоторый разрыв времени наблюдения функция распределения вероятности разрывов в наблюдении представляется в виде [14]:

$$P(\Delta t_m) = P(\Delta t < \Delta t_m) = \sum_{i=1}^m \frac{\Delta t_i}{T}.$$

Данная функция полностью характеризует эффективность применения ОС МКА ОЭН. Под показателем эффективности  $k_F$  применения системы МКА с оптико-электронной целевой аппаратурой на борту предлагается понимать гарантированную длительность разрыва времени наблюдения объекта  $\Delta t_r$  с доверительной вероятностью  $P_r = P(\Delta t < \Delta t_r)$ , задаваемой в исходных данных.

Показатель среднесуточного числа наблюдений любого объекта на заданной широте рассчитывается по формуле  $k_c = n/T_c$  ( $T_c$  — число суток наблюдений).

Показатель наибольшего разрыва времени между наблюдениями объекта на заданной широте представляется в виде  $\Delta t_{\max} = \max_{i=1, n} (\Delta t_i)$ .

Для информативности оценки эффективности применения ОС МКА ОЭН результаты проведенного моделирования применения рассмотренных ОС, состоящих из 7, 8 и 9 КА, сведены в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты оценивания эффективности ОС МКА ОЭН**

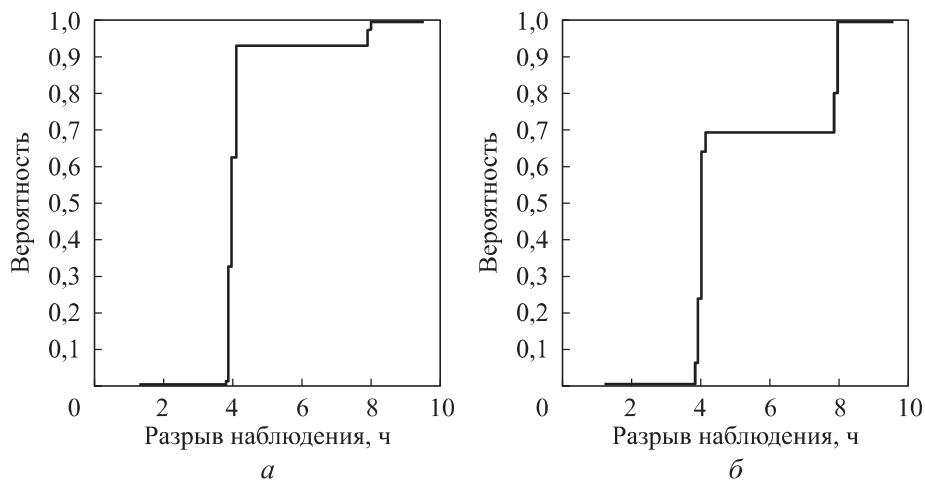
Номер системы	Число КА	φ, град	$k_c$ , 1/сут	$\Delta t_{\max}$ , ч	$k_F$ , ч	
					при $P_r = 0,95$	при $P_r = 0,9$
1	9	0	1,1	12	<b>12</b>	12
		30	1,3	14	14	14
		50	1,9	16	16	16

Номер системы	Число КА	$\varphi$ , град	$k_c$ , 1/сут	$\Delta t_{\max}$ , ч	$k_F$ , ч	
					при $P_T = 0,95$	при $P_T = 0,9$
2	8	0	0,96	24	<b>24</b>	<b>12</b>
		30	0,99	28	14	14
		50	1,5	16	16	16
3	7	0	0,89	24	24	<b>24</b>
		30	0,96	28	14	14
		50	1,3	16	16	16

Из табл. 3 следует, что

– среднее число наблюдений объекта тем выше, чем больше его широта. Это связано с тем, что с ростом значения широты, на которой расположен объект, более существенно меняется продолжительность светлого времени суток в течение года;

– гарантированные разрывы в наблюдении объекта для второй и третьей систем различны; следовательно, возможности данных систем по наблюдению объекта также отличаются, что наглядно представлено для  $P_T = 0,9$  и широты  $\psi = 0$  (рис. 3).



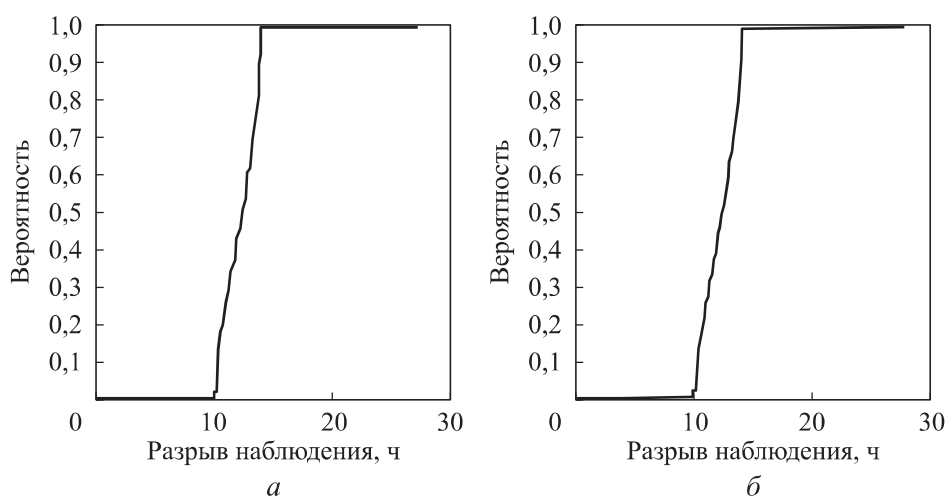
**Рис. 3.** Функция распределения вероятности разрывов в наблюдении объекта, расположенного на экваторе:

*а, б* — вторая и третья системы

На рис. 3 видно, что третья система только в 70 % случаев имеет разрыв в наблюдении меньше 4 ч, а вторая система — более чем в 90 % случаев, но при этом третья система содержит на один КА меньше, чем вторая система.



Формирование системы МКА с оптико-электронной целевой аппаратурой на борту, удовлетворяющей указанным требованиям по наблюдению объектов, с использованием традиционных показателей эффективности предполагает наличие в системе девяти МКА ОЭН, равномерно разнесенных по аргументу широты [15]. Однако результаты анализа функции распределения вероятности разрывов в наблюдении объектов на широте  $30^\circ$  данной (первой) системой и второй системой, приведенные на рис. 4, показывают, что наибольший разрыв в наблюдении для данной системы равен 2 сут, но вероятность этого разрыва составляет менее 1 %. Таким образом, добавление одного МКА в систему из восьми МКА ОЭН улучшит показатель эффективности менее чем на 1 %, что позволяет сделать вывод о нецелесообразности такого расходования ресурса.



**Рис. 4.** Функция распределения вероятности разрывов в наблюдении объектов, расположенных на широте  $30^\circ$ , для систем, состоящих из девяти и восьми МКА:  
а, б — первая и вторая системы

**Заключение.** Предложенная методика оценивания эффективности применения ОС МКА с оптико-электронной целевой аппаратурой на борту с показателем эффективности, отражающим вероятность длительности разрыва в наблюдении объектов системой МКА ОЭН, позволяет расширить инструментарий исследований по оценке эффективности применения систем МКА ОЭН.

Методику рекомендуется использовать при оценке эффективности систем МКА ОЭН неполного состава (например, при выборе стратегии наращивания ОС МКА ОЭН, прогнозировании последствий деградации баллистической структуры систем и др.), совместного применения не-

скольких ОС МКА ОЭН (например, системы Ми традиционных больших КА ОЭН), а также при оценке постановки и решения задачи синтеза баллистической структуры ОС МКА ОЭН, создаваемой в целях повышения эффективности ведения наблюдения объектов ОС КА обзора поверхности Земли.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Маргевич А.С., Резников В.М., Цветков А.В. Использование космических средств для мониторинга природных и техногенных катастроф. *Космонавтика и ракетостроение*, 2014, № 5, с. 53–57.
- [2] Мартыанова А.В. Практическое применение данных дистанционного зондирования Земли. *Ракетно-космическая техника*, 2015, № 2, с. 94–99.
- [3] Алифанов О.М., Медведев А.А., Соколов В.П. Малые космические аппараты как эволюционная ступень перехода к микро- и наноспутникам. *Труды МАИ*, 2011, № 49. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=28112&eng=N>
- [4] Макриденко Л.А., Волков С.Н., Ходненко В.П. и др. Концептуальные вопросы создания и применения малых космических аппаратов. *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*, 2010, № 1, с. 15–26.
- [5] Гансвинд И.Н. Малые космические аппараты — новое направление космической деятельности. *Международный научно-исследовательский журнал*, 2018, №12-2, с. 84–91.
- [6] Аверкиев Н.Ф., Власов С.А., Салов В.В. и др. Маневрирование космическим аппаратом с целью улучшения характеристик наблюдения района поверхности Земли. *Известия вузов. Приборостроение*, 2016, т. 59, № 10, с. 835–842.
- [7] Аверкиев Н.Ф., Богачёв С.А., Власов С.А. и др. Анализ возможностей применения формаций космических аппаратов на эллиптических орбитах для обзора поверхности Земли. *T-Сотт: Телекоммуникации и транспорт*, 2017, т. 11, № 10, с. 29–37.
- [8] Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М., Логос, 2001.
- [9] Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М., Техносфера, 2013.
- [10] Макриденко Л.А., Волков С.Н., Геча В.Я. и др. Космические аппараты дистанционного зондирования Земли высокого пространственного разрешения. Аналитический обзор по зарубежным источникам. *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*, 2017, т. 157, № 2, с. 12–31.
- [11] Макриденко Л.А., Волков С.Н., Горбунов А.В. и др. Космический аппарат «Канопус-В» № 1 — первый российский малый космический аппарат высокодетального дистанционного зондирования Земли нового поколения. *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*, 2017, т. 156, № 1, с. 10–20.
- [12] Волгин Д.А. Космическая программа дистанционного зондирования Земли и группировка космических аппаратов России. *Научные труды института непрерывного профессионального образования*, 2016, № 6, с. 211–216.

[13] Баринов К.Н., Бурдаев М.Н., Мамон П.А. Динамика и принципы построения орбитальных систем космических аппаратов. М., Машиностроение, 1975.

[14] Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М., Наука, 1969.

[15] Сихарулидзе Ю.Г. Баллистика и наведение летательных аппаратов. М., БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013.

**Проценко Петр Александрович** — канд. техн. наук, начальник лаборатории — старший научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (Российская Федерация, 197198, Санкт-Петербург, Ждановская ул., д. 13).

**Хуббиев Руслан Владимирович** — научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (Российская Федерация, 197198, Санкт-Петербург, Ждановская ул., д. 13).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Проценко П.А., Хуббиев Р.В. Методика оценивания эффективности применения орбитальных систем малых космических аппаратов оптико-электронного наблюдения. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2020, № 1, с. 29–41. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-1-29-41>

## METHOD FOR ESTIMATING THE EFFICIENCY OF SMALL ORBITAL SPACECRAFT SYSTEMS FOR OPTOELECTRONIC SURVEILLANCE

**P.A. Protsenko**

[prosvka@gmail.com](mailto:prosvka@gmail.com)

**R.V. Khubbiev**

[hubbiev.ruslan@gmail.com](mailto:hubbiev.ruslan@gmail.com)

**Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russian Federation**

---

### Abstract

The paper presents the results of analysing existing approaches to estimating how efficient small orbital spacecraft systems are for the purpose of optoelectronic surveillance, including determining their shortcomings. We simulated employing an orbital system required to ensure surveying the earth surface at various latitudes, accounting for sunrise and sunset time on the winter and summer solstice days, and discovered that the following parameters show low sensitivity: average daily object sighting number at a pre-set latitude and maximum time delay between object sightings at a pre-set latitude. We propose a new efficiency factor reflecting a confidence interval regarding the object sighting time delay. We deve-

### Keywords

*Efficiency, object sighting time delay, optoelectronic surveillance, orbital system, small spacecraft*

veloped a procedure utilising the factor proposed, expanding the scientific methodology in terms of estimating how efficient small orbital spacecraft systems are for optoelectronic surveillance. We obtained object sighting time delays at a preset latitude as functions of the probability of these delays occurring. We recommend using this procedure to estimate the efficiency of jointly employing several small orbital spacecraft systems and incomplete composition systems, as well as to state and solve the problem of synthesising the ballistic structure of an orbital system intended to improve the efficiency of earth surveillance

Received 11.04.2019

Accepted 30.05.2019

© Author(s), 2020

## REFERENCES

- [1] Margevich A.S., Reznikov V.M., Tsvetkov A.V. Utilization of space-based vehicles of monitoring of natural and anthropogenic disasters. *Kosmonavtika i raketostroenie* [Cosmonautics and Rocket Engineering], 2014, no. 5, pp. 53–57 (in Russ.).
- [2] Mart'yanova A.V. Practical application of Earth remote sensing data. *Raketno-kosmicheskaya tekhnika*, 2015, no. 2, pp. 94–99 (in Russ.).
- [3] Alifanov O.M., Medvedev A.A., Sokolov V.P. Small-scale space vehicles as the evolutionary step of transition to micro and nano satellites. *Trudy MAI*, 2011, no. 49 (in Russ.). Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=28112&eng=N>
- [4] Makridenko L.A., Volkov S.N., Khodnenko V.P., et al. Conceptual problems on creation and application of small spacecraft. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM* [Electromechanical Matters. VNIIEM Studies], 2010, no. 1, pp. 15–26 (in Russ.).
- [5] Gansvind I.N. Small spacecraft — new direction in space activities. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2018, no. 12-2, pp. 84–91 (in Russ.).
- [6] Averkiev N.F., Vlasov S.A., Salov V.V., et al. Maneuvering spacecraft to improve observation characteristics of local area of the Earth surface. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2016, vol. 59, no. 10, pp. 835–842 (in Russ.).
- [7] Averkiev N.F., Bogachev S.A., Vlasov S.A., et al. Analysis of application possibilities of formations of spacecraft in elliptical orbits for earth surface review. *T-Comm: Telekomunikatsii i transport* [T-COMM], 2017, vol. 11, no. 10, pp. 29–37 (in Russ.).
- [8] Kashkin V.B., Sukhinin A.I. *Distantsionnoe zondirovanie Zemli iz kosmosa. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* [Earth remote sensing from space. Digital image processing]. Moscow, Logos Publ., 2001.
- [9] Schowengerdt R.A. *Remote sensing: models and methods for image processing*. Academic Press, 2006.
- [10] Makridenko L.A., Volkov S.N., Gecha V.Ya., et al. High resolution Earth remote sensing satellites. Analytical review of foreign information resources. *Voprosy elektro-*

*mekhaniki. Trudy VNIEM* [Electromechanical Matters. VNIEM Studies], 2017, vol. 157, no. 2, pp. 12–31 (in Russ.).

[11] Makridenko L.A., Volkov S.N., Gorbunov A.V., et al. The first Russian next generation high resolution Earth remote sensing small satellite Canopus-V No. 1. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM* [Electromechanical Matters. VNIEM Studies], 2017, vol. 156, no. 1, pp. 10–20 (in Russ.).

[12] Volgin D.A. Space program for Earth remote sensing and grouping of Russian spacecraft. *Nauchnye trudy instituta nepreryvnogo professional'nogo obrazovaniya*, 2016, no. 6, pp. 211–216 (in Russ.).

[13] Barinov K.N., Burdaev M.N., Mamon P.A. *Dinamika i printsipy postroeniya orbital'nykh sistem kosmicheskikh apparatov* [Dynamics and principles of designing spacecraft orbital systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975.

[14] Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow, Nauka Publ., 1969.

[15] Sikharulidze Yu.G. *Ballistika i navedenie letatel'nykh apparatov* [Ballistics and aircraft guidance]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2013.

**Protsenko P.A.** — Cand. Sc. (Eng.), Head of Laboratory — Leading Research Fellow, Military (Scientific Research) Institute, Mozhaisky Military Space Academy (Zhdanovskaya ul. 13, St. Petersburg, 197198 Russian Federation).

**Khubbiev R.V.** — Research Fellow, Military (Scientific Research) Institute, Mozhaisky Military Space Academy (Zhdanovskaya ul. 13, St. Petersburg, 197198 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Protsenko P.A., Khubbiev R.V. Method for estimating the efficiency of small orbital spacecraft systems for optoelectronic surveillance. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2020, no. 1, pp. 29–41 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-1-29-41>