

---

---

# ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

---

---

УДК 629.78  
DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-8-620-625

## МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В КЛАСТЕРЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

А. В. АВЕРЬЯНОВ, А. В. КАЛЮЖНЫЙ, В. В. КУЗНЕЦОВ

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: vka\_24kaf@mil.ru*

Проанализированы параметры модели орбитального построения кластера малых космических аппаратов (МКА), предназначенных для дистанционного зондирования Земли. Обосновывается важность учета минимального удаления от поверхности Земли линии визирования между космическими объектами при создании кластера низкоорбитальных МКА. При определении функций сбора и передачи информации космическим аппаратам и порядка расположения их на орбите использованы методы половинного разбиения и золотого сечения. Обоснована целесообразность применения метода золотого сечения для обеспечения наилучших параметров орбитального кластера МКА. Улучшение параметров заключается в уменьшении на 6—8 % числа передающих космических аппаратов (МКА передачи) на орбите. Поскольку с наземными пунктами приема-обработки информации (НППОИ) непосредственно связаны передающие аппараты, то их сокращение позволит уменьшить зависимость сеансов связи орбитального кластера с НППОИ, это в конечном итоге приведет к повышению устойчивости функционирования всей орбитальной группировки МКА.

***Ключевые слова:** малый космический аппарат, параметры орбитального построения, цепочка космических аппаратов, высота линии визирования, метод половинного разбиения, метод золотого сечения, число Фидия*

Применение малых космических аппаратов (МКА) и орбитальных группировок на их основе является одним из магистральных направлений развития космических технологий. Широкое использование МКА обусловлено относительно низкой стоимостью вывода на орбиту, а также эффективностью их применения в таких областях, как дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), телекоммуникация, исследования околоземного и межпланетного пространства [1—3].

Например, группировку низкоорбитальных МКА можно успешно использовать для оперативного обнаружения пожаров. При этом низкоорбитальные средства наблюдения, по сравнению с высокоорбитальными, имеют преимущества в силе сигналов и разрешающей способности, обусловленные относительно малым расстоянием между наблюдателем и объектом. Для обеспечения высокой оперативности наблюдения пожаров необходимо использовать довольно значительную орбитальную группировку (6—12 МКА) [4].

Другой пример эффективного использования МКА — обеспечение высокоскоростным широкополосным доступом в Интернет по всему миру (особенно в местах, где он был ненадежным или полностью недоступным) с помощью глобальной спутниковой системы Starlink.

Для использования орбитальных группировок МКА необходимо оптимизировать их баллистическую структуру. Этой задаче посвящено множество научно-исследовательских работ [4—7].

Для определения принципов создания орбитальных группировок МКА, облика и основных параметров орбит космических аппаратов и бортовой аппаратуры наблюдения необходимо исключить мешающее влияние атмосферы и связанных с ней метеорологических факторов, приводящих к перерывам в наблюдениях, ослаблению и искажению получаемых и передаваемых изображений и сигналов. Вместе с тем для обеспечения высокой оперативности наблюдения низкоорбитальных КА необходимо использовать кластер, состоящий из большого числа МКА.

В качестве основных параметров орбитального построения космических объектов используют [4]:

- число орбитальных плоскостей (цепочек) МКА;
- шаг расположения МКА на орбите (угловое смещение);
- число МКА в цепочке;
- параметры движения МКА в плоскости орбиты и др.

В децентрализованном кластере МКА ДЗЗ под функциональным распределением будем понимать разделение функций сбора, обработки, хранения и передачи информации, которые может выполнять любой МКА кластера. При планировании функционирования кластера определенным МКА может назначаться одновременное выполнение нескольких функций.

Предположим, что МКА в плоскости круговой орбиты располагаются так, что обеспечивается прямая видимость всех космических аппаратов в цепочке (выполнение условия „каждый с каждым“). Будем понимать под термином „цепочка“ группу МКА, находящихся на одной орбите в зоне прямой видимости относительно друг друга. Выполнение условия „каждый с каждым“ необходимо, если часть МКА цепочки (МКА передачи) передает данные наблюдения наземным пунктам приема-обработки информации (НППОИ), а другая часть выполняет функции сбора, обработки и хранения информации (МКА сбора). Подобный подход позволяет уменьшить зависимость сеансов связи орбитального кластера с НППОИ и в результате повысить устойчивость функционирования всей орбитальной группировки [8].

При построении цепочки на орбите необходимо определить угловое смещение  $u$  крайних МКА в ней, обеспечивающее между ними прямую видимость и в то же время нахождение линии визирования на заданной высоте  $h$  относительно поверхности Земли, уменьшающей влияние мешающих факторов на каналы спутниковой связи.

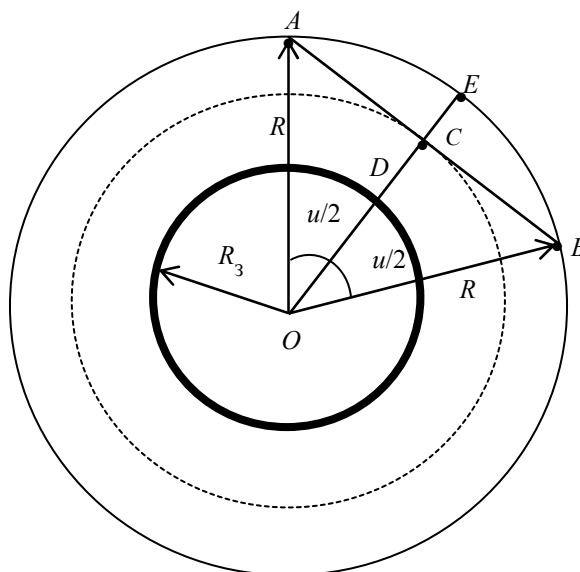


Рисунок поясняет процедуру определения параметра  $u$  в зависимости от высоты  $h$  и радиуса  $R$  круговой орбиты МКА. На рисунке используются следующие обозначения: точка

$O$  — центр Земли;  $R_3=OD=6371$  км — средний радиус Земли;  $AEB$  — дуга круговой орбиты, в пределах которой расположена цепочка МКА; точки  $A$  и  $B$  — места положения крайних в цепочке космических аппаратов;  $OA = OB = R$ ;  $DC = h$  — высота линии визирования, т.е. минимальное удаление отрезка  $AB$  от поверхности Земли, отрезок  $OC$  пересекается с отрезком  $AB$  под прямым углом; угловое смещение  $u$  на круговой орбите точки  $B$  относительно точки  $A$  равно сумме двух равных углов  $AOC$  и  $COB$ .

Из равных прямоугольных треугольников  $OAC$  и  $OBC$  получаем

$$u = 2 \arccos(OC / OA) = 2 \arccos(OC / OB) = 2 \arccos((R_3 + h) / R). \quad (1)$$

Формула (1) позволяет определить минимально возможное количество  $n$  МКА, которые можно разместить на круговой орбите при условии, что между точками  $A$  и  $B$  (на дуге  $AEB$ ) отсутствуют другие космические аппараты. Параметр  $n$  определяется значениями  $h$  и  $R$ . Значения  $u$ ,  $n$  и линейного расстояния  $AB$  для  $h=200$  км и диапазона высот МКА 300—650 км представлены в табл. 1.

Таблица 1

$R$ , км	$u$ , ...°	$N$ , шт	$AB$ , км
6671	20	18	2258
6721	24	15	2802
6771	28	12	3350
6821	32	11	3638
6871	34	10	4060
6921	36	10	4354
6971	40	9	4650
7021	42	8	4946

Из анализа табл. 1 следует, что при неизменном удалении линии визирования от поверхности Земли с ростом радиуса круговой орбиты МКА увеличивается их угловое смещение и линейное расстояние между ними. Чем ближе друг к другу значения высоты круговой орбиты и высоты линии визирования, тем больше космических аппаратов может быть размещено на орбите с заданными параметрами.

Выше было отмечено, что для обеспечения высокой оперативности наблюдения орбитальная сеть должна состоять из большого количества МКА. Например, США в рамках проекта по созданию глобальной спутниковой системы (Starlink) планируют запустить на околоземные орбиты более 10 000 космических аппаратов. Поддерживать связь НППОИ с таким количеством объектов не представляется возможным. Очевидно, что функции передачи информации с МКА на НППОИ должны быть оптимально распределены между аппаратами в цепочке. Определим, сколько должно быть передающих аппаратов и в какой последовательности они должны быть распределены на орбите, используя метод половинного разбиения и метод золотого сечения.

На дуге  $AEB$  круговой орбиты (см. рисунок) может одновременно находиться большое количество МКА. Группа космических аппаратов на дуге  $AEB$  образуют цепочку, в которой обеспечивается прямая видимость каждого объекта с каждым.

Сущность метода половинного разбиения рассмотрим на следующем примере. Допустим, что на дуге  $AEB$  орбиты находятся 18 космических аппаратов ( $n=18$ ): 1-й аппарат находится в точке  $A$ , 18-й — в  $B$ . На первом шаге разбиения передающими будут аппараты 1 и 10. Десятый МКА „делит“ всю цепочку МКА на две равные части. 1-й аппарат осуществляет передачу информации со своего борта и 2-го—9-го аппаратов; 10-й осуществляет передачу информации со своего борта и 11-го—18-го аппаратов. При этом максимальное число МКА сбора  $m_{\max}=9$ , а максимальное количество на дуге  $AEB$  равно двум ( $k=2$ ).

На втором шаге половинного разбиения увеличиваем число передающих МКА. Передающими будут аппараты 1, 5, 10 и 14, они „делят“ цепочку МКА на четыре равные части. Количество передающих аппаратов  $N=4$ ,  $m_{\max}=5$ , а  $k=2$ .

Если существует необходимость в дальнейшем увеличении числа МКА передатчиков (параметр  $N$ ), то на третьем шаге передающими аппаратами будут МКА с порядковыми номерами 1, 3, 5, 7, 10, 12, 14 и 16. Цепочка МКА разбивается на восемь равных частей, при этом разбиении  $N = 8$ ,  $m_{\max} = 3$ ,  $k = 2$ .

Для  $n=36$  и 72 параметры  $N$ ,  $m_{\max}$  и  $k$  орбитальной сети представлены в табл. 2.

Применим метод золотого сечения для определения параметров  $N$ ,  $m_{\max}$  и  $k$  орбитальной сети МКА. Напомним: золотым сечением называется отношение большей стороны прямоугольника к меньшей равно 1,618 (число Фидия,  $\Phi$ ). Правило золотого сечения формулируется как „целое относится к большей части как большее к меньшей части“. Число  $\Phi$  — иррациональное, являющееся решением полиномиального уравнения  $x^2 - x - 1 = 0$ , оно используется в самых разнообразных областях: математика, архитектура, астрономия, морфология животных и растений, дизайн и в новых областях современной науки [9].

Применение золотого сечения начнем со случая, когда цепочка МКА содержит 18 объектов, при этом передающими будут 1-й и 11-й аппараты ( $18/11 \approx 1,6$ ). На втором шаге — 1, 6, 11 и 15-й. На третьем — 1, 3, 6, 8, 11, 13, 15 и 17-й. Получающиеся при этом параметры орбитальной сети представлены в табл. 2.

Таблица 2

$n$	Половинное разбиение			Золотое сечение ( $\Phi \approx 1,6$ )		
	$N$	$m_{\max}$	$k$	$N$	$m_{\max}$	$k$
1	2	3	4	5	6	7
18	2	9	2	2	10	1
18	4	5	2	4	5	2
18	8	3	2	8	3	2
36	2	18	2	2	22	1
1	2	3	4	5	6	7
36	4	9	4	4	13	1
36	8	5	4	8	7	1
36	16	3	4	14	4	1
36					3	6
72	2	36	2	2	44	1
72	4	18	4	4	27	1
72	8	9	8	8	16	1
72	16	5	8	12	9	1
72	32	3	8	26	5	1
72					4	2
72					3	13

Параметры орбитальной сети при разбиении с использованием рассмотренных двух методов практически одинаковы для  $n=18$ . С ростом  $n$  и увеличением шагов разбиения цепочки начинают проявляться преимущества золотого сечения в сравнении с половинным разбиением для определения МКА сбора и МКА передачи.

Для  $n=36$  на четвертом шаге получаем уменьшение  $N$  (14 против 16), увеличение  $m_{\max}$  (4 против 3) и увеличение  $k$  (6 против 4 для  $m_{\max} = 3$ ).

Для  $n=72$  на четвертом шаге получаем уменьшение  $N$  (12 против 16), увеличение  $m_{\max}$  (9 против 5), а на пятом шаге имеем для  $N = 26$  (против 32),  $m_{\max} = 5, 4$  и 3, причем  $k=13$  (при половинном разбиении  $k = 8$ ) для  $m_{\max} = 3$ .

Метод золотого сечения для определения оптимальных параметров орбитального кластера целесообразно использовать при нескольких десятках или даже сотен МКА на орбите. При этом передающих аппаратов будет на 6—8 % меньше по сравнению с использованием метода половинного разбиения.

Поскольку с НППОИ непосредственно связаны передающие аппараты, то уменьшение их числа позволяет снизить зависимость сеансов связи орбитальной сети с НППОИ, это в конечном итоге приведет к повышению устойчивости функционирования всей орбитальной группировки малых космических аппаратов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рябова Н. В., Еськов Д. Н. Малые искусственные спутники Земли с оптико-электронной аппаратурой в программах дистанционного зондирования Земли // Оптик. журн. 1996. № 1. С. 4—19.
2. Гарбук С. В., Гершензон В. Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. М.: Изд-во А и В, 1997. 296 с.
3. Аверьянов А. В. Аналитический метод расчета движения малого космического аппарата // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 4. С. 75—77.
4. Инфраструктура малых космических аппаратов / Под ред. докт. техн. наук, засл. деятеля науки РФ, проф. В. Ф. Фатеева. М.: Радиотехника, 2011. 432 с.
5. Горбулин В. И. Оптимизация орбитального построения глобальных космических систем наблюдения. СПб: МО РФ, 2001. 171 с.
6. Саульский В. К. Метод расчета орбитальных группировок спутниковых систем для непрерывного обзора Земли // Исследование Земли из Космоса. 2003. № 4. С. 63—68.
7. Фатеев В. Ф., Горбулин В. И. Новый способ восполнения и модернизации навигационной системы „ГЛОНАСС“ // Полет. 2001. № 10. С. 9—11.
8. Аверьянов А. В., Эсаулов К. А., Молчанов О. Е., Белая Т. И. Система автономной навигации малого космического аппарата // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 1. С. 14—17.
9. Мир математики: в 40 тт. Т. 1: Фернандо Корбала. Золотое сечение. Математический язык красоты: пер. с англ. М.: Де Агостини, 2014. 160 с.

#### Сведения об авторах

- Алексей Васильевич Аверьянов** — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей; E-mail: vka\_24kaf@mil.ru
- Алексей Викторович Калюжный** — ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей; адъюнкт; E-mail: vka\_24kaf@mil.ru
- Вадим Викторович Кузнецов** — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей; E-mail: vka\_24kaf@mil.ru

Поступила в редакцию  
14.04.2021 г.

**Ссылка для цитирования:** Аверьянов А. В., Калюжный А. В., Кузнецов В. В. Методика обоснования функционального распределения малых космических аппаратов в кластере дистанционного зондирования Земли // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 8. С. 620—625.

#### A METHOD FOR SUBSTANTIATING AN EFFECTIVE ALLOCATION OF SMALL SPACECRAFT IN THE EARTH REMOTE SENSING CLUSTER

A. V. Averyanov, A. V. Kalyuzhnyi, V. V. Kuznetsov

A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia  
E-mail: vka\_24kaf@mil.ru

Construction of a small spacecraft cluster intended for remote sensing of the Earth is considered. Parameters of a model of the orbital construction are analyzed. The importance of accounting for the minimum distance of the straight line connecting low-orbit small spacecrafts, from the Earth's surface when creating the cluster is substantiated. The methods of half partition and golden section are used to determine the functions of collecting and transmitting information to spacecraft and the order of their location in the orbit. The expediency of using the golden section method to ensure the best parameters of the small spacecrafts orbital cluster are substantiated. The improvement of the parameters consists in a 6–8 % de-

crease in the number of transmitting spacecrafts in the orbit. Since the transmitting devices are directly connected with ground data receiving and processing points, their reduction reduces the dependence of the communication sessions of the orbital cluster with the transmitting spacecrafts number, and ultimately leads to an increase in the stability of the operation of the entire small spacecraft orbital group.

**Keywords:** small spacecraft, orbital construction parameters, spacecraft chain, line-of-sight height, half-split method, golden section method, Phidias number

#### REFERENCES

1. Ryabova N.V., Es'kov D.N. *Journal of Optical Technology*, 1996, no. 1, pp. 4–19. (in Russ.)
2. Garbuk S.V., Gershenzon V.E. *Kosmicheskiye sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Space Systems for Earth Remote Sensing), Moscow, 1997, 296 p. (in Russ.)
3. Averyanov A.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2009, no. 4(52), pp. 74–77. (in Russ.)
4. Fateev V.F., ed., *Infrastruktura malyykh kosmicheskikh apparatov* (Infrastructure of Small Spacecraft), Moscow, 2011, 432 p. (in Russ.)
5. Gorbulin V.I. *Optimizatsiya orbital'nogo postroyeniya global'nykh kosmicheskikh sistem nablyudeniya* (Optimization of the Orbital Construction of Global Space Observation Systems), St. Petersburg, 2001, 171 p. (in Russ.)
6. Saulskiy V.K. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2003, no. 4, pp. 63–68. (in Russ.)
7. Fateev V.F., Gorbulin V.I. *Polet*, 2001, no. 10, pp. 9–11. (in Russ.)
8. Averyanov A.V., Esaulov K.A., Molchanov O.E., Belaya T.I. *Journal of Instrument Engineering*, 2015, no. 1(58), pp. 14–17. (in Russ.)
9. Corbalán F. *The Golden Ratio: The mathematical language of beauty*, National Geographic, 2016.

#### Data on authors

- Aleksey V. Averyanov** — PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Information and Computing Systems and Networks; E-mail: vka\_24kaf@mil.ru
- Aleksey V. Kalyuzhnyi** — A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Information and Computing Systems and Networks; Adjunct; E-mail: vka\_24kaf@mil.ru
- Vadim V. Kuznetsov** — PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Information and Computing Systems and Networks; E-mail: vka\_24kaf@mil.ru

**For citation:** Averyanov A. V., Kalyuzhnyi A. V., Kuznetsov V. V. A method for substantiating an effective allocation of small spacecraft in the Earth remote sensing cluster. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 8. P. 620–625 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-8-620-625