

Методика поиска структуры баллистически связанной группы космических аппаратов, удовлетворяющей заданным требованиям наблюдения поверхности Земли

Technique of searching of structure of a ballistically connected group of space vehicles complying with the set requirements of Earth observation

Житников / Zhitnikov T.

Тимофей Андреевич

(0606848@rambler.ru)

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия

имени А.Ф. Можайского»

(ВКА имени А.Ф. Можайского) МО РФ,

адъюнкт кафедры навигационно-баллистического

обеспечения применения космических средств

и теории полёта летательных аппаратов.

г. Санкт-Петербург

Кульвиц / Kulvic A.

Алексей Владимирович

(0606848@rambler.ru)

кандидат технических наук.

ВКА имени А.Ф. Можайского,

старший преподаватель кафедры

навигационно-баллистического обеспечения

применения космических средств и теории полёта

летательных аппаратов.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: космический аппарат – space vehicle; орбитальная группировка – orbit group; баллистически связанная группа космических аппаратов – ballistically connected group of space vehicles; периодический обзор поверхности Земли – periodic Earth coverage; синтез систем космических аппаратов – space vehicles system synthesis.

Изложены основные этапы процесса баллистического проектирования систем космических аппаратов (КА) с использованием баллистически связанных групп КА. Представлены основные результаты решения задачи синтеза орбитальной структуры баллистически связанной группы КА в составе трех КА, которая обеспечит выполнение целевой задачи с требуемыми показателями результативности.

The article contains main stages of ballistic designing of space vehicles (SV) systems with the use of ballistically connected groups of SVs. The article represents main results of solution of the problem of the orbital structure synthesis of a ballistically connected group of SVs consisting of 3 SVs which shall ensure performance of the specific problem with the required performance indicators.

На современном этапе научно-технического развития с помощью космических систем (КС) решаются многие важные задачи. Одной из таких задач является задача дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), под которой понимается сбор и передача информации с поверхности Земли. Космические системы ДЗЗ в настоящее время успешно используются различными потребителями, и в первую очередь военными.

Активное развитие систем космических аппаратов (КА) ДЗЗ в радиолокационном диапазоне с использованием баллистически связанных групп (БСГ) – образований из нескольких КА, движущихся на сравнительно близком взаимном расстоянии от нескольких десятков метров до сотни километров и объединённых общностью решаемых задач, открывает качественно новые возможности решения задач различного целевого назначения [1].

Под баллистически связанной группой КА (БСГ КА) понимают совокупность КА (не менее двух), наибольшее расстояние между которыми на всем интервале орбитального полёта существенно (на порядки) меньше длины витка орбиты:

$$\max l_{i,j} \ll l \quad i=1 \dots n-1, j=i+1 \dots n \quad (1)$$

где

i, j – номер КА, где ($i \neq j$);

n – количество КА в составе БСГ КА;

$l_{i,j}$ – расстояние между КА на всем интервале активного существования [1].

Актуальность применения ОГ КА на базе БСГ КА обусловлена следующими факторами:

– применение бортовой аппаратуры КА в составе БСГ КА позволяет реализовать радиолокационные методы (разностно-дальномерный, интерферометрический и др.) определения местоположения источника радиоизлучения и обеспечивать значительно более высокую точность определения координат источника излучения, а также реализовать более современную организацию ретрансляции данных, обеспечивающую глобальность обзора в сочетании с высокой оперативностью передачи данных [1].

– потребность видов и родов войск Вооруженных сил РФ в информационном обеспечении, с тактико-техническими требованиями и точностными характеристиками, которые могут быть реализованы только на базе БСГ КА.

ОГ КА на базе БСГ, КА активно применяются США («White Cloud»), Китаем («Yaogan»), Германией и другими странами [2, 3]. Вопросам баллистического построения систем КА с использованием БСГ в РФ и за рубежом уделяется повышенное внимание [4,5].

С точки зрения классификации систем КА с использованием БСГ КА – это системы периодического обзора, но в качестве структурного элемента выступает не одиночный КА, а БСГ КА. В связи с этим методы и алгоритмы решения задачи синтеза и анализа таких систем КА будут другими, с новыми требованиями и ограничениями. В ряде случаев, применительно к системе КА с использованием БСГ, КА – это повышенные требования к конфигурации треугольника, образованного КА и т.д. [1]. Все эти особенности построения БСГ КА необходимо учитывать на этапах баллистического проектирования систем КА с использованием БСГ [6].

Как правило, процесс баллистического проектирования систем КА (ОГ КА) содержит несколько этапов, основными из которых являются:

- изучение основных целевых задач, стоящих перед системой КА;
 - приближенный выбор класса орбит, позволяющих решать поставленные задачи;
 - приближенный выбор орбитальной структуры системы;
 - исследование динамики системы с приближенной орбитальной структурой;
 - уточненный синтез орбитальной структуры системы;
 - выбор законов управления орбитами системы КА [6].
- Целесообразно рассматривать первый и третий этап совместно, т. е. решать оптимизационную задачу по поиску оптимальной структуры БСГ КА на множестве допустимых орбит.

Под допустимым множеством орбит КА будем понимать диапазон параметров орбит КА, который может быть обеспечен средствами выведения, ограничениями на функционирование бортовой аппаратуры и требованиями по структурной устойчивости БСГ КА.

Рассмотрим более подробно задачу синтеза орбитальной структуры БСГ КА в составе трех КА, которая обеспечит требуемый целевой эффект (решение целевой задачи с требуемыми показателями результативности).

Сначала сформулируем требования, которые следуют из целевой задачи и представляют собой неравенство (2)

$$d_{\min} < d_{13}(t), d_{23}(t), d_{12}(t) \leq d_{\max}, \quad (2)$$

где $t \in [0, t_k]$ – заданный интервал времени функционирования БСГ КА, $d_{13}(t), d_{23}(t), d_{12}(t)$ – относительное расстояние между КА 1–3, 2–3, 1–2 соответственно; $d_{\min}, d_{\max}$

– минимально и максимально допустимое расстояние между КА на всем интервале полета.

Моделирование различных вариантов пространственного расположения КА в составе БСГ КА позволило определить зависимость между точностью определения местоположения источника радиоизлучения и геометрическими характеристиками треугольника образованного БСГ КА [7]. Результативность решения целевой задачи БСГ КА на интервале времени $t \in [0, t_k]$ можно оценить при помощи функционала

$$J = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3), \quad (3)$$

где $F_i(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ – нормированный показатель точности определения местоположения источника радиоизлучения; $\gamma_1(t), \gamma_2(t), \gamma_3(t)$ – углы треугольника, в вершинах которого располагаются КА 1–3; $n = \frac{t}{h}$, где h – шаг интегрирования.

Модель движения БСГ КА представляет собой параметры движение центра масс одного КА относительно другого. Как правило, первый КА принимают в качестве базового. Для описания движения центра масс КА в составе БСГ КА можно воспользоваться сопряженной системой обыкновенных дифференциальных уравнений следующего вида:

$$\begin{cases} \frac{d\vec{q}_1}{dt} = f(\vec{q}_1, \vec{q}_2, t) \\ \frac{d\vec{q}_2}{dt} = f(\vec{q}_2, \vec{q}_1, t) \end{cases} \quad (4)$$

где $\vec{a}_1, \vec{a}_2$ – вектор координат и скорости второго КА относительно базового,

$\vec{q}_2, \vec{q}_1$ – вектор координат и скорости третьего КА относительно базового.

Путем интегрирования системы сопряженных дифференциальных уравнений (4) были получены характеристики относительного движения КА в составе БСГ КА – $d_{13}(t), d_{23}(t), d_{12}(t)$. На рис. 1–4 приведены результаты моделирования относительного движения КА в составе БСГ КА для круговых и эллиптических орбит.

Анализ относительного движения КА в составе БСГ КА позволил выделить свойства, которые возможно использовать при баллистическом проектировании ОГ КА на базе БСГ КА.

1) Периоды обращения КА в составе БСГ КА должны быть одинаковыми для удовлетворения требований работы бортовой аппаратуры (реализацией разностно-дальномерного способа место определения), при этом геометрические характеристики орбит КА могут отличаться

$$T_i = T_j, \quad i \neq j,$$

$$r_{ni} \neq r_{nj}, \quad r_{ai} \neq r_{aj}, \quad i \neq j$$

где i, j – номер КА, ($i \neq j$).

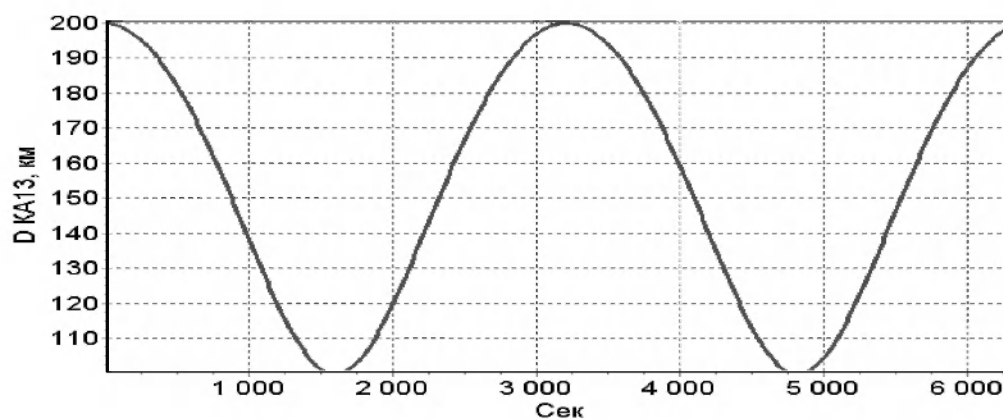


Рис. 1. Относительное расстояние между КА 1,3 на интервале одного витка (орбиты круговые)

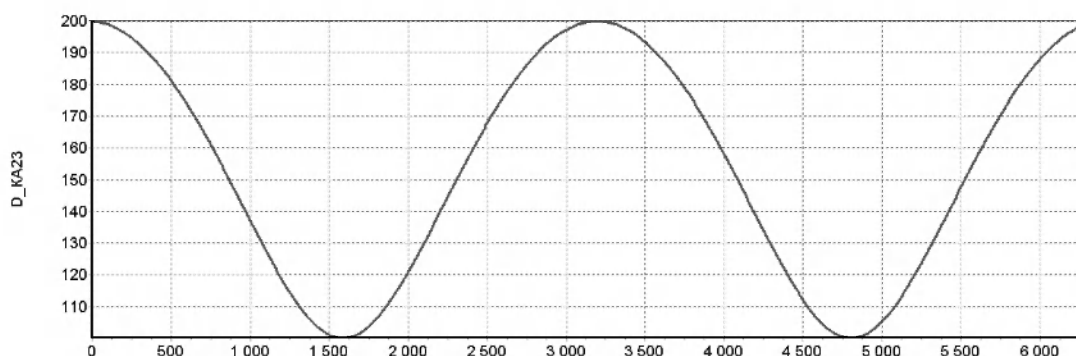


Рис. 2. Относительное расстояние между КА 2,3 на интервале одного витка (орбиты круговые)

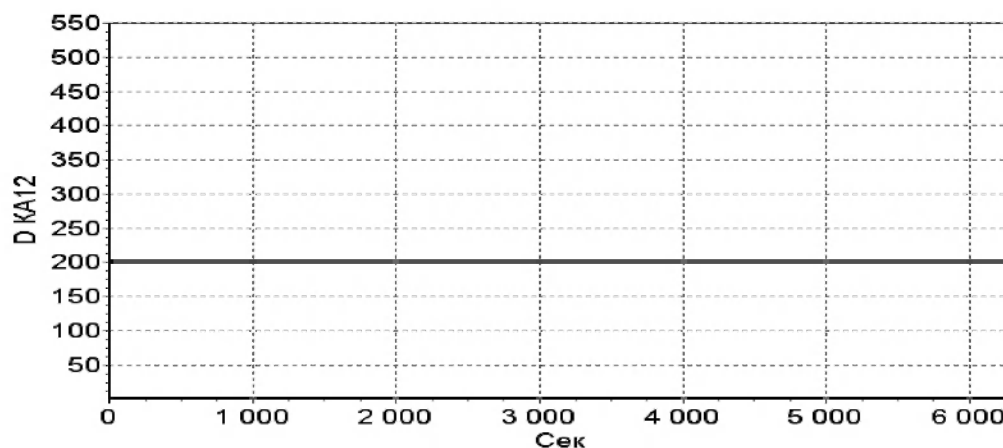


Рис. 3. Относительное расстояние между КА 1,2 на интервале одного витка (орбиты круговые)

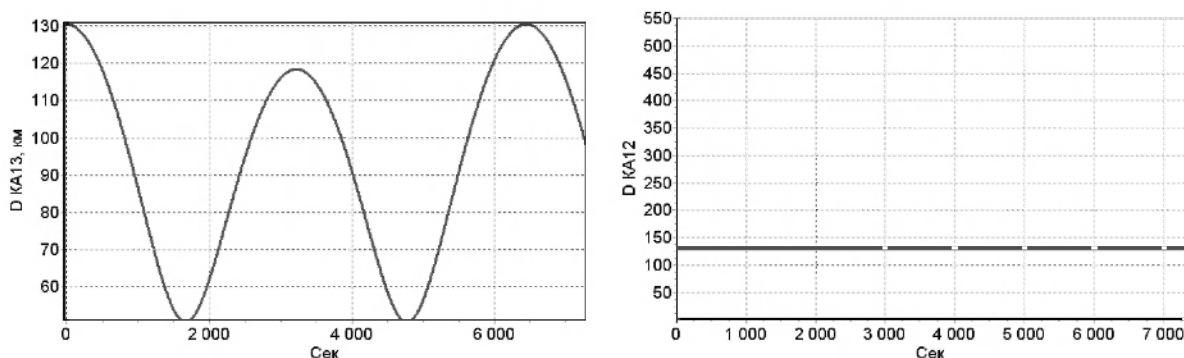


Рис. 4. Относительное расстояние между КА 1 и 3, 1 и 2 на интервале одного витка (орбиты: круговая и эллиптическая)

2) Относительное положение КА в составе БСГ КА имеет периодичность через интервал времени четверть периода $\frac{T}{4}$, если орбиты круговые, и $\frac{T}{2}$, если хотя бы одна из орбит эллиптическая.

Задача синтеза структуры БСГ КА в составе трех КА состоит в поиске такой орбитальной структуры, которая на интервале времени $t \in [0, t_k]$ удовлетворяет ограничениям (2) и обеспечивает максимум функционала (3).

С учётом необходимости решения оптимизационной задачи поиска оптимальной структуры БСГ КА в составе трех КА совместно с выбором и обоснованием параметров орбит каждого КА возникает многопараметрическая оптимизационная задача, причём в настоящее время, научно-методические подходы для решения которой отсутствуют. Так орбита КА однозначно задается шестью параметрами

$$\bar{q} = [\Omega, i, \omega, e, a, \tau]^T,$$

поэтому оптимизационная задача синтеза структуры БСГ КА будет иметь $3 \times 6 = 18$ параметров оптимизации.

Как один из возможных путей её решения – это декомпозиционный подход, при котором рассматривается совокупность частных задач на замкнутом множестве, ограниченном множеством допустимых орбит КА. Под допустимым множеством орбит КА будем понимать диапазон параметров орбит КА, который может быть обеспечен средствами выведения, ограничениями на функционирование бортовой аппаратуры и требованиями по структурной устойчивости БСГ КА. Предполагается что разбиение (декомпозиция) общей задачи на частные будет происходить с учетом того, что каждая частная задача будет иметь решение, а множество частных решений образуют множество всех решений общей задачи.

Для каждой частной задачи находится решение и формируется множество решений, выбирается общий критерий оптимальности (3) и на множестве допустимых решений выбирается оптимальное в соответствии с выбранным критерием.

Декомпозиция задачи синтеза структуры БСГ КА в составе трех КА представлена на рис. 5.

Рассмотрим случай произвольного расположения БСГ КА в составе трех КА для наклонных $i = i_{\text{зад}} < 90^\circ$ круговых орбит, как представлено на рис. 6. Обозначим структуру БСГ КА u_j, Ω_j , где $j = 1, 2, 3$ – номер КА соответственно. Рассмотрим сферический треугольник ABC, в вершинах которого разместим КА-1, КА-2, КА-3. Обозначим $\Phi_{12}, \Phi_{13}, \Phi_{23}$ стороны сферического треугольника, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ долготы подспутниковых точек, через ψ_1, ψ_2, ψ_3 широты подспутниковых точек.

Тогда, используя теорему косинусов для сторон сферического треугольника ABC, получим

$$\begin{aligned} \cos \Phi_{12} &= \sin \psi_1 \sin \psi_2 + \cos \psi_1 \cos \psi_2 \cos(\lambda_2 - \lambda_1), \\ \cos \Phi_{13} &= \sin \psi_1 \sin \psi_3 + \cos \psi_1 \cos \psi_3 \cos(\lambda_3 - \lambda_1), \\ \cos \Phi_{23} &= \sin \psi_2 \sin \psi_3 + \cos \psi_2 \cos \psi_3 \cos(\lambda_3 - \lambda_2). \end{aligned}$$

Для входящих в приведённых формулах тригонометрических функций координат подспутниковых точек можно использовать формулы

$$\begin{aligned} \sin \psi_j &= \sin u_j \sin i, \\ \cos \psi_j \cos \lambda_j &= \cos \Omega_j \cos u_j - \sin \Omega_j \sin u_j \cos i, \\ \cos \psi_j \sin \lambda_j &= \sin \Omega_j \cos u_j + \cos \Omega_j \sin u_j \cos i. \end{aligned}$$

где $j = 1, 2, 3$.

После несложных преобразований получим

$$\begin{aligned} \cos \Phi_{12} &= \sin u_1 \sin u_2 \sin^2 i + (\cos \Omega_1 \cos u_1 - \sin \Omega_1 \sin u_1 \cos i) \times \\ &\quad \times (\cos \Omega_2 \cos u_2 - \sin \Omega_2 \sin u_2 \cos i) + \\ &\quad (\sin \Omega_1 \cos u_1 - \cos \Omega_1 \sin u_1 \cos i) \times (\sin \Omega_2 \cos u_2 + \cos \Omega_2 \sin u_2 \cos i) \\ \cos \Phi_{13} &= \sin u_1 \sin u_3 \sin^2 i + (\cos \Omega_1 \cos u_1 - \sin \Omega_1 \sin u_1 \cos i) \times \\ &\quad \times (\cos \Omega_3 \cos u_3 - \sin \Omega_3 \sin u_3 \cos i) + \\ &\quad (\sin \Omega_1 \cos u_1 - \cos \Omega_1 \sin u_1 \cos i) \times (\sin \Omega_3 \cos u_3 + \cos \Omega_3 \sin u_3 \cos i), \\ \cos \Phi_{23} &= \sin u_2 \sin u_3 \sin^2 i + (\cos \Omega_2 \cos u_2 - \sin \Omega_2 \sin u_2 \cos i) \times \\ &\quad \times (\cos \Omega_3 \cos u_3 - \sin \Omega_3 \sin u_3 \cos i) + \\ &\quad (\sin \Omega_2 \cos u_2 - \cos \Omega_2 \sin u_2 \cos i) \times (\sin \Omega_3 \cos u_3 + \cos \Omega_3 \sin u_3 \cos i). \end{aligned} \quad (5)$$

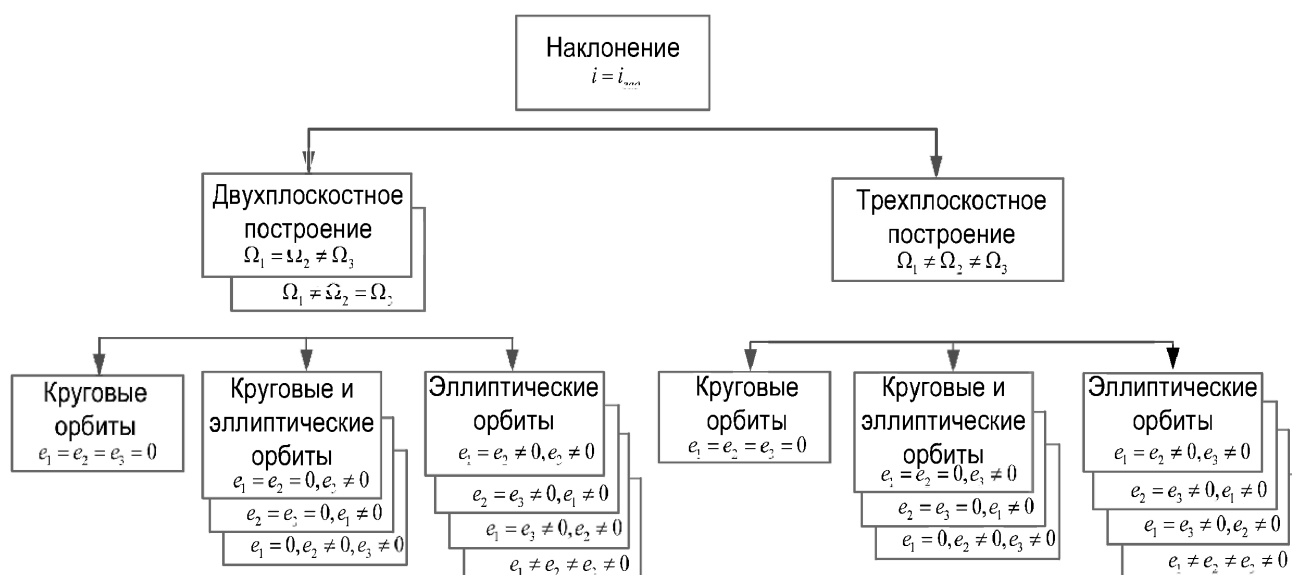


Рис. 5. Декомпозиция задачи поиска оптимальной структуры БСГ КА в составе трех КА

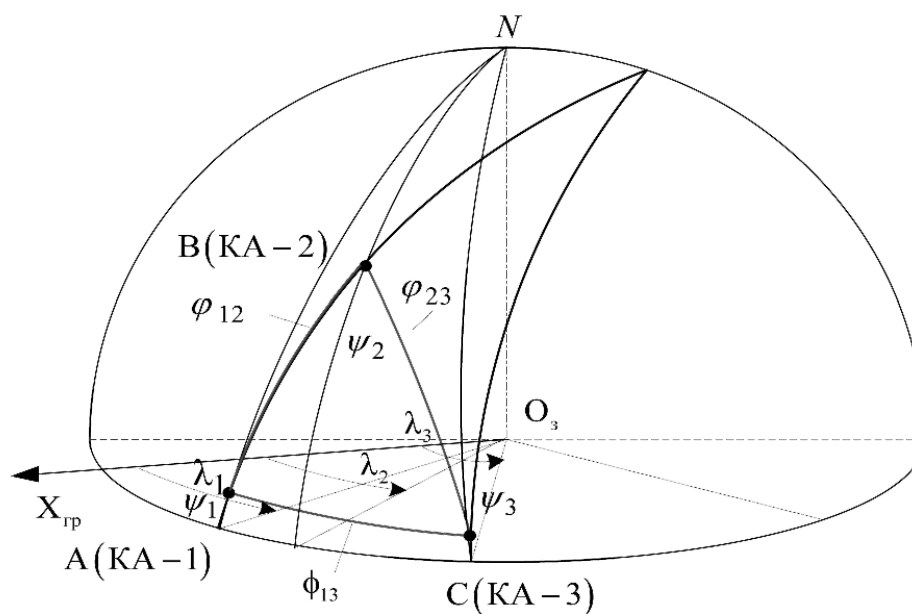


Рис. 6. Случай произвольного расположения БСГ КА в составе трех КА для наклонных круговых орбит

Выбор (поиск) начального приближения для решения оптимизационных задач имеет существенное значение и предопределяет возможность нахождения самого решения [8, 9].

Под структурой БСГ КА будем понимать орбитальные элементы КА и связи между ними, т.е. структура задает положение КА относительно других КА, решающих совместную целевую задачу в составе БСГ КА. В ряде случаев для математического описания структуры достаточно определить относительное положение КА по всем или части кеплеровским элементам.

Для схемы, полученной в результате декомпозиции задачи, в случае, когда три КА из состава БСГ КА располагаются на круговых наклонных орбитах, структура БСГ КА будет задаваться пятью КЭО, так как три КА располагаются в двух плоскостях:

Пусть КА-1 $u_1 = 0, \Omega_1 = 0$ (как правило, первый КА располагают на экваторе). Тогда структура БСГ КА запишется следующим соотношением:

$$u_1 = 0^\circ, \Omega_1 = 0^\circ - \text{КА-1};$$

$$u_2 \in (u^{\text{доп}}, u_2 \neq 0^\circ), \Omega_1 = 0^\circ - \text{КА-2};$$

$$u_3 \in u^{\text{доп}}, \Omega_2 \in \Omega^{\text{доп}} - \text{КА-3};$$

Таким образом, решение оптимизационной задачи сводится к оптимизации по трём параметрам u_2, Ω_2, u_3 , при которых функционал (3) достигает максимума, при удовлетворении ограничений (2)

$$J(u_2, \Omega_2, u_3) \rightarrow \max \quad (6)$$

$$d_{\min} \leq d_{13}(u), d_{23}(u), d_{12}(u) \leq d_{\max}. \quad (7)$$

Динамика относительного движения КА в составе БСГ КА в случае, когда расстановка КА, определяющая структуру, происходит в окрестностях экватора, показывает, что максимальное расстояние между КА будет на экваторе, а минимальное в окрестностях точек вертекса $u_j \approx 90^\circ$. Для поиска начального приближения, рассмотрим сферический треугольник ABC (рис. 7).

Вначале определим структуру БСГ КА, при которой относительные расстояния максимальны, т.е. ограничение (2) преобразуется в выражение (3)

$$d_{13}(u) = d_{23}(u) = d_{12}(u) = d_{\max}, \quad (8)$$

где $u = 0$.

Как видно из рис. 7, вершины подспутниковых точек КА 1–3 образуют равносторонний треугольник. Используя теорему косинусов, найдем аргумент широты, при котором принимает относительное расстояние между КА-1 и КА-2 максимально, т.е. $d_{12}(u=0) = d_{\max}$

$$u = \arccos\left(\frac{d_{\max}^2 - 2r_1^2}{2r_1^2}\right),$$

где r_1 – радиус круговой орбиты.

Для определения оставшихся элементов Ω_2, u_3 воспользуемся системой уравнений и соотношениями (4)

$$\cos \varphi_{12} = \cos \varphi_{13}$$

$$\cos \varphi_{13} = \cos \varphi_{23}$$

Учтём, что для рассмотренной схемы $u_1 = 0^\circ, \Omega_1 = 0^\circ, \Omega_2 = \Omega_3$. После несложных преобразований получим

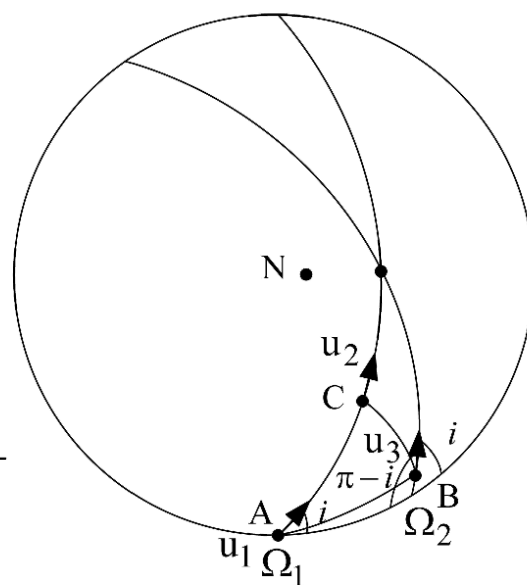
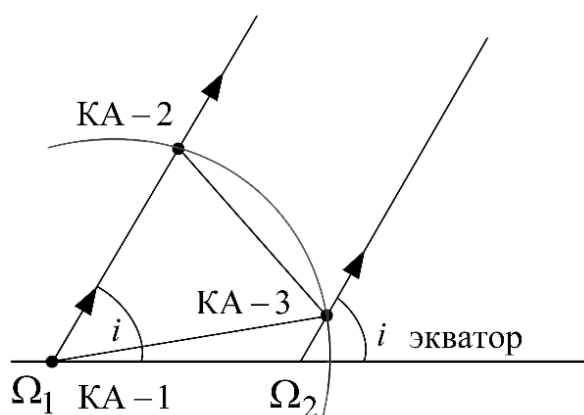


Рис. 7. Проекция сферического треугольника БСГ КА на плоскость (слева); модель движения баллистически связанной группы КА над поверхностью Земли (справа)

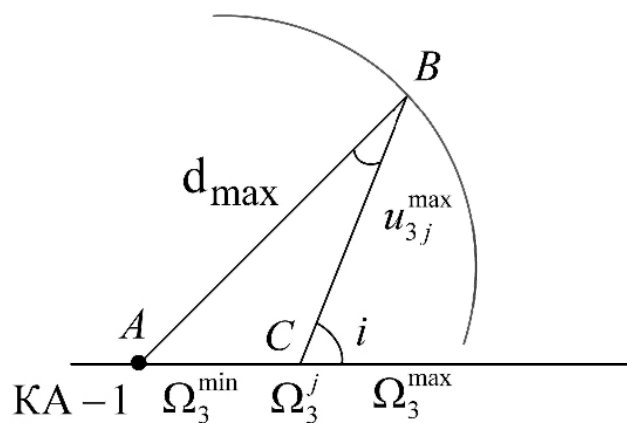


Рис. 8. Определение верхней границы перебора по $n_3^{\max}$

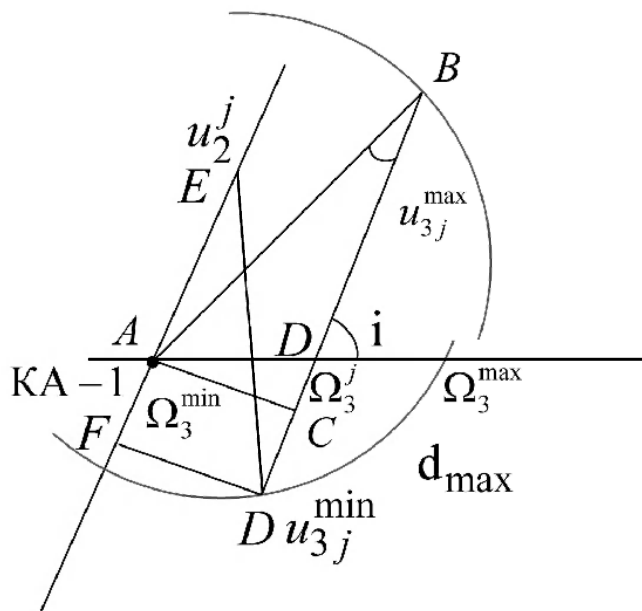


Рис. 9. Определение нижней границы перебора по $u_3^{\max}$

$$\begin{aligned} \cos \varphi_{12} &= (\cos \Omega_2 \cos u_2 - \sin \Omega_2 \sin u_2 \cos i) + \\ &+ (\sin \Omega_2 \cos u_2 + \cos \Omega_2 \sin u_2 \cos i) \cos \varphi_{13} = \\ &= (\cos \Omega_2 \cos u_3 - \sin \Omega_2 \sin u_3 \cos i) + \\ &+ (\sin \Omega_2 \cos u_3 + \cos \Omega_2 \sin u_3 \cos i), \\ \cos \varphi_{23} &= \sin u_2 \sin u_3 \sin^2 i + \\ &+ (\cos \Omega_2 \cos u_2 - \sin \Omega_2 \sin u_2 \cos i) \times \\ &(\cos \Omega_2 \cos u_3 - \sin \Omega_2 \sin u_3 \cos i) + \\ &+ (\sin \Omega_2 \cos u_2 + \cos \Omega_2 \sin u_2 \cos i) \times \\ &(\sin \Omega_2 \cos u_3 + \cos \Omega_2 \sin u_3 \cos i). \end{aligned} \quad (9)$$

Решив данную систему трансцендентных уравнений относительно Ω_2, u_3 одним из численных методов, получим относительное положение КА-3, которое обеспечивает $d_{13\max}, d_{12\max}, d_{23\max}$ на экваторе. Таким образом u_2, Ω_2, u_3 , обеспечивают относительную структуру БСГ КА, которая соответствует предельным значениям ограничения (3).

Теперь определим структуру БСГ КА, при которой относительные расстояния минимальны, т.е. ограничение (2) преобразуется в выражение (3)

$$d_{13}(u) = d_{23}(u) = d_{12}(u) = d_{\min}, \quad (10)$$

Решив систему трансцендентных уравнений (9), найдем Ω_3, u_2 . Для определения верхней и нижней границы перебора по аргументу широты КА-3 u_3 введём следующие обозначения $\Omega_3^{\max}, \Omega_3^{\min}$ (рис. 8), тогда

$$\Delta \Omega = \frac{\Omega_3^{\max} - \Omega_3^{\min}}{n},$$

где n – целое число. Тогда $\Omega_3^j = \Omega_3^{\min} - \Delta \Omega j$, где $j=1..n$.

Рассмотрим треугольник ABC,

$$AC = r_1 \Omega_3^j.$$

Используя теорему синусов, найдем угол B:

$$\sin B = \frac{\sin(\pi - i) \cdot AC}{d_{\max}}.$$

Тогда по теореме косинусов найдем сторону BC

$$BC = \sqrt{(d_{\max})^2 + AC^2 - 2d_{\max}AC \cos B},$$

$$u_3^{\max} = \frac{BC}{2\pi r_1}.$$

$$FD = \sqrt{(d_{\max})^2 - \left(\frac{2\pi r_1}{u_3^j}\right)^2}, \quad AD = \sqrt{FD^2 - AC^2},$$

$$u_3^{\min} = \frac{2\pi r_1}{\sqrt{AD}}.$$

Теперь найдем нижнюю границу аргумента широты КА-3 $u_3^{\min}$. Рассмотрим треугольник FED (рис. 9)

Таким образом, метод поиска оптимальной структуры БСГ КА сводится к перебору по трём параметрам u_2, Ω_2, u_3 в следующем диапазоне, границы которого были получены ранее

$$u_2^j \in [u_2^{\min}, u_2^{\max}],$$

$$\Omega_3^j \in [\Omega_3^{\min}, \Omega_3^{\max}],$$

$$u_3^j \in [u_3^{\min}(u_2^j, \Omega_3^j), u_3^{\max}(u_2^j, \Omega_3^j)].$$

Пример реализации рассмотренного метода, для случая круговых орбит и исходных данных (табл. 1) представлен в табл. 2 и на рис. 10.

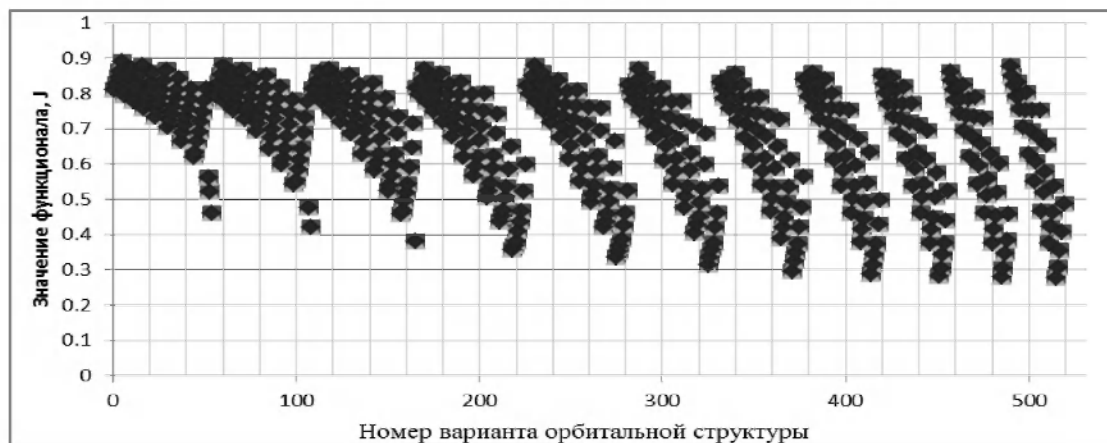


Рис. 9. Значение показателя результативности для различных вариантов орбитальных структур БСГ КА

Таблица 1

Исходные данные начальных условий БСГ КА

номер КА	a, км	e	i, град	Ω , град	u, град	ω , град
1	7480.5	0.0	63.4	0	0	0
2	7480.5	0.0	63.4	0	1.53191595	0
3	7480.5	0.001	63.4	1.48381904	0.10141854	0

Таблица 2

Пример реализации метода поиска оптимальной структуры БСГ КА,
состоящей из 3-х КА

Номер варианта	u_2 , град	Ω_2 , град	u_3 , град	Ω_3 , град	d13(u=0), км	d13(u=90), км	d23(u=0), км	d23(u=90), км	J
1	1.53	1.48	0.101	199.99	100.03	199.1	100	200	0.811
2	1.42	1.48	0.101	199.99	100.03	192	85	185	0.827
3	1.3	1.48	0.101	199.99	100.03	185.8	70	170	0.845
4	1.19	1.48	0.101	199.99	100.03	180.7	55	155	0.864
5	1.07	1.48	0.101	199.99	100.03	176.7	40	140	0.889
6	1.53	1.37	0.101	185.49	93.52	191.6	106.5	200	0.795
7	1.42	1.37	0.101	185.49	93.52	183.6	91.5	185	0.811
8	1.3	1.37	0.101	185.49	93.52	176.6	76.5	170	0.829
9	1.19	1.37	0.101	185.49	93.52	170.7	61.5	155	0.848
10	1.07	1.37	0.101	185.49	93.52	165.8	46.5	140	0.871
11	1.53	1.26	0.101	170.99	87.01	184.9	113	200	0.778
12	1.42	1.26	0.101	170.99	87.01	176.1	98	185	0.793
13	1.3	1.26	0.101	170.99	87.01	168.2	83	170	0.811
14	1.19	1.26	0.101	170.99	87.01	161.3	68	155	0.83
15	1.07	1.26	0.101	170.99	87.01	155.6	53	140	0.853
.....									

Рассмотренный метод поиска оптимальной структуры БСГ КА в составе трех КА сводит многопараметрическую задачу оптимизации к частным задачам, у которых значительно уменьшается число оптимизационных параметров (до 3–4), перебор которых происходит по конечным аналитическим формулам.

Кроме того, метод позволяет находить оптимальные структуры и для случая движения БСГ КА в условиях действия возмущающих факторов и проводить анализ структурной устойчивости БСГ КА на заданном интервале времени.

Литература

1. Лобанов, А. Г. К вопросу о баллистическом построении при проведении интерферометрической съёмки / А.Г. Лобанов, В.И. Семункина // Космонавтика и ракетостроение. – 2012. – № 5. – С. 41–47.
2. Агапов, В. А. Два новых спутника для NRO / В.А. Агапов // Новости космонавтики. – 2002. – № 5. – С. 11–12.
3. Кучейко, А. В. USA-160: ситуация проясняется / А.В. Кучейко // Новости космонавтики. – 2002. – № 8. – С. 44–47.
4. Андронов, А. А. Космическая система радиотехнической разведки ВМС США «Уайт Клауд» / А.А. Андронов // Зарубежное военное обозрение. – 1993. – № 7. – С. 57–60.
5. Аверкиев, Н. Ф. Баллистическое построение систем космических аппаратов связи и пассивной радиолокации лунной поверхности / Н.Ф. Аверкиев, С.А. Васьков, В.В. Салов // Изв. ВУЗов. Приборостроение. – 2008. – № 12. – С. 66–73.
6. Баллистическое проектирование систем космических аппаратов: учеб. пособие / С.А. Власов [и др.] – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2007. – 86 с.
7. Власов, С. А. Анализ пространственно-временных характеристик при решении задачи периодического наблюдения системой КА / С.А. Власов, А.В. Кульвиц, Д.А. Мосин // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2010. – Вып. 645, Т. 2. – С. 72–75.
8. Овчинников, М. Ю. Влияние слабых возмущений на относительное движение двух спутников / М.Ю. Овчинников, С.С. Ткачев // Препринты ИПМ имени М.В. Келдыша. – 2005. – № 69. – 24 с.
9. Кочегурова, Е. А. Теория и методы оптимизации / Е.А. Кочегурова; Томский политехнический университет. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2012. – 157 с.