

МАНЕВРИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАБЛЮДЕНИЯ РАЙОНА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Н. Ф. АВЕРКИЕВ, С. А. ВЛАСОВ, В. В. САЛОВ, В. В. КИСЕЛЕВ

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: kiselev24.07.86@mail.ru

Рассматривается задача маневрирования космическим аппаратом по изменению периода его обращения для увеличения числа проходов через заданный район наблюдения в течение нескольких суток подряд. Приведены аналитические выражения, связывающие области перерыва в наблюдении в сутках с характеристикой ширины полосы обзора на широте. Построены области перерыва, в основании которых лежат квазисинхронные орбиты; отмечено, что в зависимости от соотношения взаимно простых целых чисел q, p , характеризующих квазисинхронную орбиту, обеспечиваются различные возможности наблюдения заданного района, выраженные величиной перерыва в наблюдении в сутках либо временем наибольшего перерыва в наблюдении. Рассчитано значение управляющего импульса скорости для изменения периода обращения КА и предложены орбиты, при „перевод“ на которые возможно улучшение характеристик наблюдения.

Ключевые слова: баллистическая структура, ширина полосы обзора на широте, маневр космического аппарата.

Вопросы расчета баллистической структуры системы космических аппаратов (КА) периодического наблюдения поверхности Земли, анализа структурной устойчивости системы КА рассматривались в работах [1—7]. Однако в этих работах расчет ширины полосы обзора проводился на экваторе и вопросы управления КА для наблюдения района поверхности Земли в течение нескольких суток подряд не рассматривались.

Под районом наблюдения понимается часть поверхности Земли, ограниченная нижней и верхней широтами, и расчет характеристики ширины полосы обзора на широте производится для каждого значения широты района с некоторым заданным шагом. Рассмотрим вначале задачу определения орбиты КА, обеспечивающей наблюдение района на поверхности Земли в течение нескольких суток подряд, если заданы ширина полосы обзора на широте $\Delta\lambda_\varphi$, драконический период T_Ω , наклонение i круговой орбиты и соответствующие этим параметрам эффективные сутки $T_{\text{эф}}$. Под T_Ω понимается промежуток времени между двумя последовательными пересечениями плоскости небесного экватора в восходящем узле, под $T_{\text{эф}}$ — время полного оборота Земли относительно восходящего узла орбиты. На рис. 1 представлено расположение восходящих узлов B_i ($i = \overline{1, n}$, i — номер восходящего узла, а n — число восходящих узлов в сутки).

На рис. 2 показано расположение полос обзора на одном межвитковом расстоянии (цифрами вне скобок обозначены номера витков, а в скобках — номера суток). В каждые сутки, начиная со вторых, межвитковое расстояние покрывается на величину $\Delta\lambda = \min\{\Delta\lambda_{\text{св}}, \Delta\lambda_{\text{сз}}\}$, где $\Delta\lambda_{\text{сз}} = (1 - m)\Delta\lambda_{\text{мв}}$ — величина западного суточного сдвига восхо-

дящих узлов орбиты, $\Delta\lambda_{CB} = m\Delta\lambda_{MB}$ — величина восточного суточного сдвига B_i , $m = \left\{ \frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} \right\}$,

$\{ \cdot \}$ — дробная часть числа, $\Delta\lambda_{MB} = 2\pi \frac{T_{\Omega}}{T_{\text{эф}}}$ — величина межвиткового расстояния.

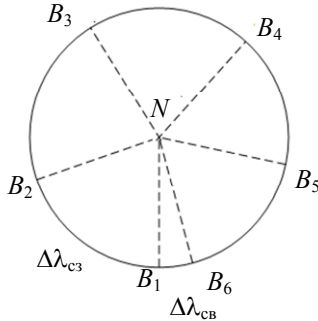


Рис. 1

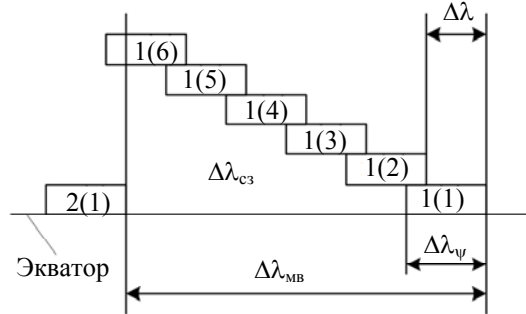


Рис. 2

Если значение $\Delta\lambda_{\psi}$ больше величины $\Delta\lambda$, то количество суток, необходимых для покрытия всего межвиткового расстояния, может быть определено следующим образом [1]:

$$C = \begin{cases} \left[\frac{\Delta\lambda_{MB} - \Delta\lambda_{\psi}}{\Delta\lambda} \right] + 2, & \text{если } \frac{\Delta\lambda_{MB} - \Delta\lambda_{\psi}}{\Delta\lambda} \text{ — дробное,} \\ \frac{\Delta\lambda_{MB} - \Delta\lambda_{\psi}}{\Delta\lambda} + 1, & \text{если } \frac{\Delta\lambda_{MB} - \Delta\lambda_{\psi}}{\Delta\lambda} \text{ — целое.} \end{cases}$$

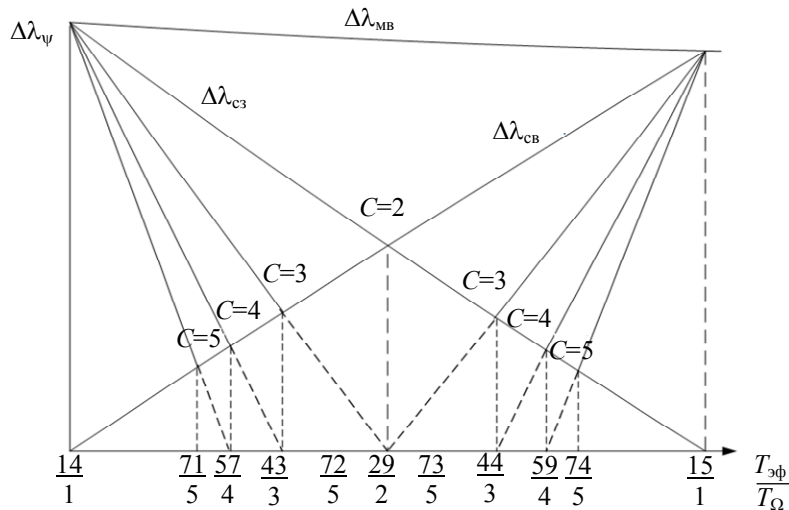


Рис. 3

На рис. 3 приведен пример областей перерыва в наблюдении для $\Delta\lambda_{\psi} < \Delta\lambda_{MB}$. Как видно из рисунка, при каждом значении C минимальные значения $\Delta\lambda_{\psi}$ соответствуют квазисинхронным орбитам (орбитам, трасса полета которых замыкается через определенные промежутки времени), для этого необходимо, чтобы эффективные сутки относились к драконическому периоду как взаимно простые целые числа q, p [4], т.е.

$$\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} = \frac{p}{q}, \quad T_{\text{эф}} = \frac{2\pi}{\omega_3 - \dot{\Omega}},$$

$\omega_3 = 7,29 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ — угловая скорость вращения Земли, $\dot{\Omega}$ — угловая скорость прецессии восходящего узла орбиты, обусловленная влиянием полярного сжатия Земли:

$$\dot{\Omega} = \frac{3\pi}{T_{\Omega}} \frac{\pi_2}{\mu p^2} \cos i .$$

Здесь $\mu = 398600,44 \text{ км}^3/\text{с}^2$, $\pi_2 = -1,7555 \cdot 10^{10} \text{ км}^5/\text{с}^2$.

Таким образом, за q эффективных суток КА совершает ровно p оборотов. Орбиты при этом называют q -суточными.

Если полоса обзора не проходит через полюса, минимальное угловое расстояние между узлами на некоторых широтах будет равно минимальному угловому расстоянию между одноименными узлами

$$\Delta\lambda_{\min} = \frac{2\pi}{p} .$$

В зависимости от четности чисел p, q нисходящие узлы по-разному располагаются относительно восходящих. Определим минимальное угловое расстояние между восходящими узлами B_i ($\Delta\lambda_{\min}$) за q суток. Так как за это время КА совершает ровно p оборотов, на экваторе равномерно размещается p восходящих узлов B_i . При нечетных значениях чисел p, q ($\frac{q+p}{2}$ — целое число) восходящие узлы совпадают с нисходящими, и минимальное расстояние

(не равное нулю) между узлами $\Delta\lambda_{\min} = \frac{2\pi}{p}$.

Отсутствие возможности наблюдения при условии $\Delta\lambda_{\psi} \in [\Delta\lambda, 2\Delta\lambda)$ можно оценить значением C или временем наибольшего перерыва в наблюдении

$$\Delta t_1 = pT_{\Omega} = qT_{\text{эф}} .$$

Под временем наибольшего разрыва в наблюдении одиночного КА понимается наибольший период наблюдения произвольных точек на поверхности Земли [1, 2, 4].

Между областями перерыва и квазисинхронными орбитами можно установить следующие связи:

$$\begin{aligned} C_n &= C' + C'' , \\ \frac{p_n}{q_n} &= \frac{p' + p''}{q' + q''} . \end{aligned}$$

Границы областей для наибольшего перерыва в наблюдении Δt_1 (областей C) будут представляться отрезками прямых линий (рис. 4).

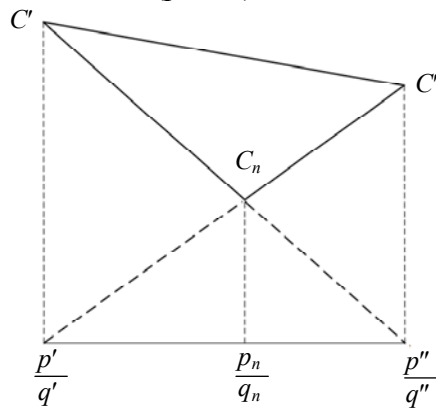


Рис. 4

Если $\Delta\lambda_{\psi} \in [\Delta\lambda, 2\Delta\lambda)$, то обеспечивается возможность наблюдения каждой точки на широте как минимум на одной восходящей и на одной нисходящей ветви траектории в течение

ние одних суток, но отдельные точки могут наблюдаться в течение двух суток подряд на восходящих ветвях и в течение двух суток подряд — на нисходящих.

При $\Delta\lambda_{\psi} > \Delta\lambda$ полосы обзора частично накладываются с интервалом в сутки, как на восходящих, так и на нисходящих ветвях. Если район наблюдения попадает в область наложения полос обзора на восходящей или нисходящей ветвях траектории, его обслуживание происходит трижды за двое суток подряд, если на восходящей и нисходящей — четыре раза за двое суток подряд. Для получения такой возможности трасса полета может быть изменена. При этом параметры орбиты после маневра при необходимости могут быть восстановлены.

Если $\Delta\lambda_{\psi} = 2\Delta\lambda$, то обеспечивается возможность наблюдения каждой точки на широте на восходящих ветвях траектории двое суток подряд и столько же — на нисходящих. При $\Delta\lambda_{\psi} \in [2\Delta\lambda, 3\Delta\lambda)$ обеспечивается возможность наблюдения каждой точки на широте как минимум и на восходящих, и на нисходящих ветвях двое суток подряд, но отдельные точки могут наблюдаться до трех раз подряд на восходящих ветвях и столько же на нисходящих в течение двух суток подряд.

На рис. 5 приведены области, в которых обеспечивается возможность наблюдения два раза и более в течение нескольких суток подряд.

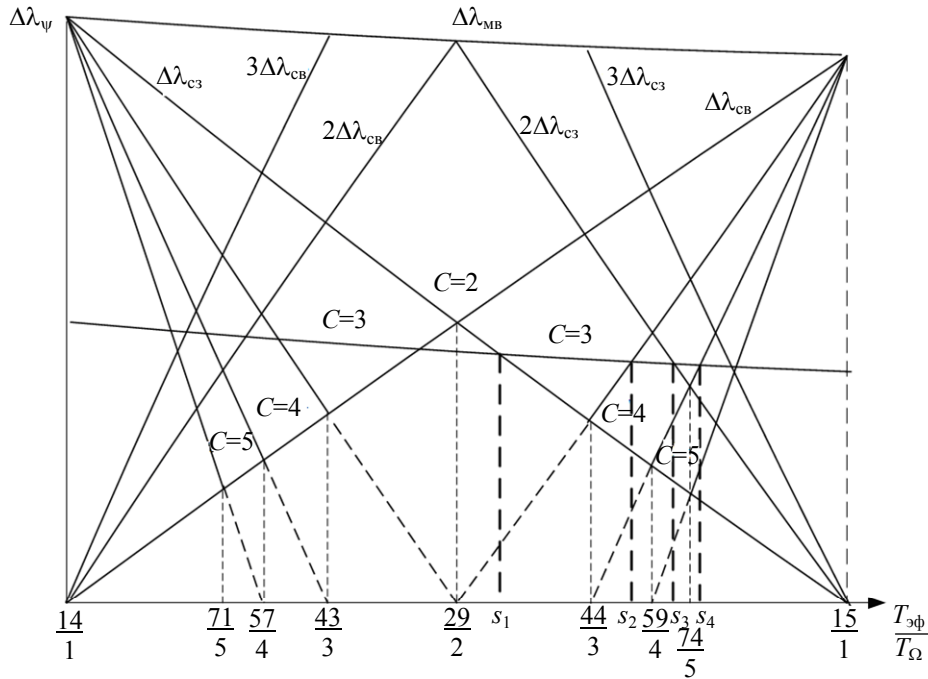


Рис. 5

Для увеличения числа последовательных проходов через район на заданной широте необходимо выполнить маневр КА по изменению периода обращения. Например, если число оборотов КА в сутки $\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} \in [s_1, s_2]$, то гарантирована возможность наблюдения каждой точки

на широте как минимум на одной восходящей ветви и на одной нисходящей ветви траектории. Для увеличения числа последовательных проходов через район до гарантированных двух раз подряд на восходящих ветвях и столько же на нисходящих необходимо перевести число оборотов КА в сутки в интервал $\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} \in [s_3, s_4]$. Например, с орбиты $\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} = \frac{44}{3}$ можно пе-

рейти на орбиту орбиты $\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} = \frac{74}{5}$, т.е. необходимо изменить период обращения КА.

Период обращения КА зависит только от величины большой полуоси орбиты a . Следовательно, для изменения периода на исходной орбите на величину ΔT достаточно произвести такой маневр, при котором большая полуось изменилась бы на Δa . Известно, что оптимальный маневр по изменению большой полуоси характеризуется импульсом, приложенным в перигее орбиты. Изменить положение трассы полета относительно района наблюдений можно, изменив период обращения КА. Расчет управляющего импульса скорости ΔV для маневра по изменению периода обращения КА, движущегося по околокруговой орбите, будет осуществляться по формуле

$$\Delta V = V_{\text{кр}} \left(\sqrt{2 - \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta T}{T_1}\right)^{2/3}} - 1} \right),$$

где $V_{\text{кр}}$ — скорость движения по исходной круговой орбите; T_1 — период обращения исходной орбиты.

Для перехода с орбиты $\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} = \frac{44}{3}$ на орбиту $\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} = \frac{74}{5}$ необходимо $\Delta V = 65$ м/с. Таким

образом, в результате маневра по изменению периода обращения КА число последовательных проходов через район увеличилось до двух раз подряд на восходящих ветвях и до двух раз подряд на нисходящих.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов С. А., Кубасов И. Ю., Селин В. А. Расчет баллистической структуры системы космических аппаратов периодического обзора поверхности Земли // Тр. ВКА им. А. Ф. Можайского. 2010. Вып. 627. С. 129—131.
2. Власов, С. А., Кульвиц А. В., Жаткин А. Т., Киселев В. В. Особенности и перспективы развития баллистического построения систем КА морского наблюдения // Тр. ВКА им. А. Ф. Можайского. 2014. Вып. 644. С. 106—110.
3. Коваленко, А. Ю. Анализ структурной устойчивости разнородной системы КА // Тр. СПИИРАН. 2014. №4(35). С. 108—116.
4. Власов С. А., Кубасов И. Ю., Селин В. А. Выбор баллистической структуры системы космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Тр. ВКА им. А. Ф. Можайского. 2010. Вып. 625. С. 76—80.
5. Аверкиев, Н. Ф., Салов В. В., Жаткин А. Т., Киселев В. В. Модификация баллистической структуры орбитальной группировки космических аппаратов на основе принципа оптимального управления // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 7. С. 23—25.
6. Аверкиев Н. Ф., Васьков С. А., Салов В. В. Баллистическое построение системы космических аппаратов связи и пассивной радиолокации лунной поверхности // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т. 47, № 2. С. 10—15.
7. Коваленко А. Ю. Баллистическое проектирование разнородной системы КА с заданным циклом замыкания трассы // Тр. СПИИРАН. 2015. № 3 (40). С. 45—54.

Сведения об авторах

- Николай Федорович Аверкиев** — д-р техн. наук, профессор; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра навигационно-баллистического обеспечения применения космических средств и теории полетов летательных аппаратов; E-mail: averkievnf@yandex.ru
- Сергей Александрович Власов** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра навигационно-баллистического обеспечения применения космических средств и теории полетов летательных аппаратов
- Вячеслав Викторович Салов** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра навигационно-баллистического обеспечения применения космических средств и теории полетов летательных аппаратов

Вячеслав Владимирович Киселев — адъюнкт; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедры навигационно-баллистического обеспечения применения космических средств и теории полетов летательных аппаратов;
E-mail: kiselev24.07.86@mail.ru

Рекомендована кафедрой
навигационно-баллистического
обеспечения применения
космических средств и теории
полетов летательных аппаратов

Поступила в редакцию
06.07.15 г.

Ссылка для цитирования: *Аверкиев Н. Ф., Власов С. А., Салов В. В., Киселев В. В.* Маневрирование космическим аппаратом с целью улучшения характеристик наблюдения района поверхности Земли // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 10. С. 798—803.

**MANEUVERING BY SPACECRAFT TO IMPROVE CHARACTERISTICS
OF THE EARTH SURFACE AREA OBSERVATION**

N. F. Averkiev, S. A. Vlasov, V. V. Salov, V. V. Kiselev

A. F. Mozhaysky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia
E-mail: kiselev24.07.86@mail.ru

The problem of increasing the number of a spacecraft passes above a given observation area for several days a row through the spacecraft maneuvering is considered. Analytical expressions relating duration of observation time gap in days and the latitudinal width characteristic of the swath are presented. The gap areas based on quasi-synchronous orbits are constructed. It is shown that different conditions of observation of a given region (observation gap expressed in days or the time of maximal break in the observation) are realized depending on relation between the mutually simple numbers q and p characterizing the quasi-synchronous orbit. The speed control pulse to change period of the spacecraft revolution is evaluated and orbits allowing an improvement of observation conditions are specified.

Keywords: ballistic structure, bandwidth survey on latitude, spacecraft maneuver.

Data on authors

- Nikolay F. Averkiev** — Dr. Sci., Professor; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Navigation and Ballistic Support of Aerospace Means Application and Aircraft Flight Theory; E-mail: averkievnf@yandex.ru
- Sergey A. Vlasov** — PhD; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Navigation and Ballistic Support of Aerospace Means Application and Aircraft Flight Theory
- Vyacheslav V. Salov** — PhD; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Navigation and Ballistic Support of Aerospace Means Application and Aircraft Flight Theory
- Vyacheslav V. Kiselev** — Adjunct; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Navigation and Ballistic Support of Aerospace Means Application and Aircraft Flight Theory; E-mail: kiselev24.07.86@mail.ru

For citation: *Averkiev N. F., Vlasov S. A., Salov V. V., Kiselev V. V.* Maneuvering by spacecraft to improve characteristics of the Earth surface area observation // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 10. P. 798—803 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-10-798-803