

УДК 629.7.015

А. С. АЛБУЛ, М. Ф. БАБАКОВ,

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского, Харьков

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОШИБОК ВЫВЕДЕНИЯ И ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ ОРБИТАЛЬНОГО ПОСТРОЕНИЯ МНОГОСПУТНИКОВЫХ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СИСТЕМ

**Рассматривается влияние негативных факторов на деградацию орбитальной группировки многоспутниковых низкоорбитальных систем. Приводятся расчетные соотношения как для существующих орбитальных структур, так и для перспективных вариантов построения. В результате определены условия сохранения орбитальных свойств сети.**

**Ключевые слова:** многоспутниковая низкоорбитальная система; космический аппарат; орбитальная структура; возмущающие факторы.

### Введение

Человечество уже не может обходиться без спутниковых систем связи и передачи информации. Перспективным направлением развития телекоммуникационных систем является построение многоспутниковых низкоорбитальных систем (МНС) высокоскоростной передачи данных (ВПД). Основой МНС является орбитальная система космических аппаратов (КА), которая определяется как совокупность КА, упорядоченно расположенных на орбитах и совместно выполняющих целевые задачи системы [1; 5; 6].

Для многоспутниковой сети, в отличие от одиночного КА, большую роль играют не только собственно параметры орбит, но и относительное положение каждого отдельно взятого КА в сети. Воздействие возмущающих факторов на движение КА приводит к нарушению первоначального взаимного положения КА и в ряде случаев может стать причиной полного разрушения навигационно-баллистической структуры сети [1–3].

Одним из основных требований, предъявляемых к перспективным МНС, является обеспечение устойчивости параметров орбит, при которой достигается минимизация энергетических затрат на заданное орбитальное построение системы и его поддержание в течение всего времени ее активного существования.

Актуальной задачей для развития перспективных спутниковых систем остается создание модели динамики орбитального построения МНС с учетом всех воздействующих факторов на навигационно-баллистическую структуру таких систем [5].

**Целью статьи** является анализ влияния ошибок выведения и возмущающих факторов на изменение орбитального построения МНС.

### Основная часть

В процессе функционирования сети параметры орбит КА подвергаются воздействию различных возмущающих факторов. Это может привести

к нарушению работоспособности МНС и необходимости восстановления параметров орбитальной структуры.

Особенностью МНС глобального обслуживания является то, что качество функционирования системы зависит не столько от возмущения орбит каждого отдельного КА, сколько от возмущения относительного движения КА орбитальной сети [2].

Основными возмущающими факторами, влияющими на движение КА, являются [2; 3; 7]:

- аэродинамическое торможение в верхних слоях атмосферы;
- нецентральность гравитационного поля Земли;
- гравитационное поле Солнца и Луны;
- давление солнечного излучения;
- космический мусор и пр.

При этом на относительное положение КА в сети помимо возмущающих сил существенно влияют и начальные отклонения от заданных орбитальных параметров КА, обусловленные погрешностями выведения на орбиту (включая ошибки определения параметров орбит).

Отметим, что наиболее разрушительными факторами, влияющими на орбитальную структуру сети, являются вековые изменения параметров орбит.

Торможение в верхних слоях атмосферы вызывает вековое уменьшение периода обращения. Однако круговая орбита остается круговой, т. е. если орбиты КА имеют одинаковый радиус  $r$ , то атмосфера Земли не вызывает накапливающихся относительных отклонений.

Из анализа [7] следует, что влияние атмосферы целесообразно учитывать до высот 600...1000 км при большом отношении площади поперечного сечения КА к его массе.

На высотах менее 2000 км гравитационное поле Солнца и Луны пренебрежимо малы по сравнению с возмущениями, вызванными нецентральностью гравитационного поля Земли, в первую очередь второй зональной гармоникой разложения геопотенциала.

Влияние нецентральной гравитационного поля проявляется неодинаково по отношению к различным элементам орбит. Например, такие параметры, как большая полуось  $a$ , эксцентриситет  $e$  и наклонение орбит  $i$  не накапливают возмущения под действием гравитационного поля, а параметры долготы восходящего узла  $\Omega$  и аргумент перигея  $\omega$  испытывают вековые изменения:

$$\delta\Omega_1 = 3\pi C_{20} \left( \frac{R_3}{p} \right)^2 \cos i; \quad (1)$$

$$\delta\omega_1 = 1,5\pi C_{20} \left( \frac{R_3}{p} \right)^2 (5\sin^2 i - 1), \quad (2)$$

где  $\delta\Omega_1$ ,  $\delta\omega_1$  — вековые изменения соответственно долготы восходящего узла и аргумента перигея за один виток;

$p$  — фокальный параметр (для круговых орбит  $p = r_0$ );

$R_3 = 6378$  км — средний экваториальный радиус Земли;

$C_{20} = -1098,08 \cdot 10^{-6}$  — коэффициент во втором члене разложения гравитационного потенциала Земли по полиномам Лежандра.

Драконический период обращения подвергается возмущению:

$$T_\Omega = T \left( 1 - \frac{3}{4} C_{20} \frac{R_3^2}{r^2} (1 + 5\cos^2 i - 6\sin^2 u_0 \sin^2 i) \right), \quad (3)$$

где  $T$  — кеплеровский период обращения,  
 $T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}}$ ;  $u_0 = u(t_0)$ .

Из (1), (2), (3) следует, что нецентральность гравитационного поля приводит к таким эффектам:

1) прецессии линии узлов, скорость которой прямо пропорциональна косинусу наклонения орбиты (у полярных орбит прецессия отсутствует);

2) вращению линии апсид, т. е. вращению большой оси эллиптической орбиты в экваториальной плоскости (линия апсид неподвижна при

$$i = \arcsin \sqrt{\frac{4}{5}} = 63,4^\circ;$$

3) изменению периода обращения (интервал времени между последовательными прохождением КА восходящего узла с наклонением больше периода его обращения по экваториальной орбите).

Остальные возмущения имеют, как правило, периодический характер и не влияют на стабильность орбиты КА.

Наиболее критично для МНС глобального обслуживания не абсолютное, а относительное изменение положения КА в сети, которое может привести к уменьшению кратности покрытия, ухудшению связности и др.

Факторы, влияющие на стабильность орбитальной структуры МНС, приведены в таблице.

### Влияние гравитационных возмущений на относительное положение КА

Если КА в сети имеют одинаковую высоту орбиты и одинаковые наклонения, то, согласно (1), вековое смещение восходящего узла будет одинаковым. Следовательно, ориентация друг относительно друга останется прежней, а изменится лишь положение сети относительно Земли. Это также справедливо и для относительного положения перигея орбит. Наибольшей изменчивостью, даже при отсутствии ошибок выведения КА на орбиту, обладают сети, созданные на основе КА с различным наклонением орбит.

Вследствие возмущения конического периода обращения происходит изменение относительного углового положения КА на орбите [2]:

$$\delta u_{ij1} = 2\pi \frac{\delta T_{ij}}{T} = \frac{9}{2} C_{20} \frac{R_3^2}{r^2} \sin^2 i (\sin^2 u_{0j} - \sin^2 u_{0i}), \quad (4)$$

где  $\delta u_{ij1}$  — изменение угловой дальности между  $i$ -м и  $j$ -м КА за один виток.

Из (4) следует, что КА, расположенный на полярной орбите высотой  $H = 4680$  км, «догонит» соседний КА, первоначально отстоящий по аргументу широты на  $45^\circ$ , через 456 витков, т. е. примерно через 38 сут.

Стабильность орбитальной сети КА обеспечивается при выполнении следующих условий (при отсутствии начальных возмущений для нормального гравитационного поля, нецентральность которого оценивается второй зональной гармоникой  $C_{20}$ ):

- 1) одинаковые наклонения орбит  $i$ ;
- 2) одинаковая геометрия орбит на плоскости ( $p, e, w$ );
- 3) начальные значения аргументов широты  $u_{0k}$  должны быть кратны  $2\pi$ .

Последнее требование невыполнимо, поскольку вступает в противоречие с требованием обеспечения заданной кратности покрытия.

### Влияние погрешностей выведения и коррекции орбит на динамику орбитальной структуры сети

Погрешности таких параметров, как наклонение  $i$  и фокальный параметр  $p$  (большая полуось  $a$ ), приведут к появлению накапливающихся относительных отклонений по параметрам  $\Omega, w, u$ .

Относительное отклонение по долготе восходящего узла за  $n$  витков выражается в виде

$$\delta\Omega_{ij} = -3\pi C_{20} \frac{R_3^2}{p_0^2} n \delta i_{ij} \sin i_0 - 6\pi C_{20} \frac{R_3^2}{p_0^3} n \delta p_{ij} \cos i_0. \quad (5)$$

Формула (5) устанавливает зависимость изменения взаимной ориентации плоскостей орбит от ошибок выведения по наклонению и фокальному параметру  $p = a(1 - e^2)$ .

Расчет по формуле (5) показывает, что при относительных ошибках  $\delta p_{ij}/p_0 = 0,0001$  (что для

Факторы, влияющие на стабильность орбитальной структуры МНС

Фактор	Негативное влияние	Структурный элемент, подвергающийся влиянию	Наибольшее влияние для высот орбит $H$ , км
1. Нецентральность гравитационного поля Земли	- Прецессия линии узлов; - вращение линии апсид; - изменение периода обращения	Действует на движение отдельно взятого КА	< 2000
2. Аэродинамическое торможение в верхних слоях атмосферы	Вековое изменение (уменьшение) периода обращения	Действует на движение КА	< 600...1000
3. Гравитационное поле Солнца и Луны	Изменение параметров орбиты	Действует на движение КА	> 2000
4. Давление солнечного излучения	Периодический характер (не особо сказывается на стабильности орбиты КА)	Действует на движение КА	> 2000
5. Космический мусор	Периодический характер (не особо сказывается на стабильности орбиты КА)	Действует на движение КА	600...2000
6. Начальные отклонения от заданных орбитальных параметров КА	Изменение параметров орбиты	Относительное положение КА в сети	-
7. Вековые изменения параметров орбит	Изменение параметров орбиты	Относительное положение КА в сети	-

круговой орбиты высотой 1500 км соответствует ошибке выведения по большой полуоси примерно 0,8 км),  $\delta i_{ij} = 20'$  (угловых минут) и наклонении  $i = 83^\circ$  скорость изменения взаимной ориентации орбит составит соответственно  $0,0001^\circ/\text{сут}$  и  $0,023^\circ/\text{сут}$ , т. е. за 6 месяцев накапливается смещение узлов примерно на  $42^\circ$ .

Примечательно, что для полярных орбит ( $i = 90^\circ$ ) влияние ошибок выведения по фокальному параметру на  $\Omega$  равно нулю и максимально для ошибок выведения по наклонению  $i$ . Для приэкваториальных орбит ( $i = 0^\circ$ ) ситуация изменяется на противоположную.

Погрешности выведения КА на орбиту оказывают наибольшее влияние на внутриспоскодную структуру сети. Относительные ошибки по высоте орбиты и скорости вызовут нарастающее во времени относительное отклонение по аргументу широты  $u$

$$\delta u_{ij}(t) = -6\pi \left( \frac{\Delta V_{ij} t}{VT_0} + \frac{\Delta r_{ij} t}{rT_0} \right), \quad (6)$$

где  $\Delta V_{ij}$ ,  $\Delta r_{ij}$  — относительные ошибки выведения  $i$ -го и  $j$ -го КА соответственно по скорости и положению;

$T_0$  — период обращения КА.

Например, при  $T_0 = 115$  мин ( $H \sim 1500$  км),  $\Delta V = 0,1 \dots 10$  м/с,  $\Delta r = 0,1, \dots, 10$  км изменение относительной угловой дальности составит  $0,2 \dots 37^\circ/\text{сут}$ , в то время как погрешности  $\delta u_{ij}$ , вычисленная по формуле (4) за это же время, пренебрежимо мала.

Согласно формулам (5) и (6) можно определить предельные значения ошибок выведения (коррекции) по наклонению и высоте орбит для заданного срока эксплуатации (либо интервала между коррекциями) сети КА.

Также следует отметить, что ошибки выведения и коррекции не вызывают вековых отклонений параметров  $a, e, i$ . Относительные ошибки по этим элементам орбит постоянны и определяются только погрешностями выведения и коррекции.

**Влияние возмущающих факторов на навигационно-баллистическую структуру МНС**

Анализ эволюции орбитальной сети МНС под воздействием возмущающих факторов и ошибок выведения (коррекции орбит) КА показывает, что наиболее разрушительное воздействие на навигационно-баллистическую структуру (при построении сети на круговых орбитах с одинаковой высотой и наклонением) вызывают [5; 6]:

♦ относительные ошибки выведения по высоте  $\delta H_{ij}$  (большой полуоси) орбиты и скорости КА, которые из-за изменения угловой дальности между КА одной плоскости (6) приводят к сравнительно быстрому разрушению внутриспоскодной структуры сети, а также относительно медленному нарушению взаимной ориентации плоскостей орбит по долготе восходящего узла (5);

♦ ошибки выведения по наклонению  $\delta i_i$ , также вызывающие относительный дрейф линии узлов  $\delta \Omega_i$  (5).

Указанные нарушения навигационно-баллистической структуры сети могут привести к ухудшению условий покрытия поверхности Земли зонами обслуживания с заданной кратностью.

**Условия сохранения свойств сети**

При определении количества плоскостей орбит в сети осуществляется округление до целого

в большую сторону [6]. В этом случае допустимое (т. е. не приводящее к нарушению непрерывности обслуживания) относительное отклонение долготы восходящего узла (например, для полярных орбит) рассчитывается по следующим формулам:

$$\delta\Omega_{\text{доп}} = b - \frac{\pi}{2m}; \quad b = \arccos \frac{\cos\varphi_3}{\cos(\pi/n)}. \quad (7)$$

Согласно (5) и (7) рассчитываются допустимые ошибки выведения КА по наклонению  $i$  и высоте орбиты  $H$  для сохранения требуемых характеристик сети в течение срока эксплуатации.

Исходя из того, что при определении количества  $n$  КА в каждой орбитальной плоскости также осуществляется округление до целого в большую сторону, можно определить допустимое смещение по аргументу широты по следующим формулам:

$$\Delta u_{\text{ном}} = \frac{2\pi}{n}; \quad (8)$$

$$\Delta u_{\text{доп}} = 2 \arccos \left( \frac{\cos\varphi_3}{\cos b} \right); \quad (9)$$

$$\delta u_{\text{доп}} = \frac{\Delta u_{\text{доп}} - \Delta u_{\text{ном}}}{2}. \quad (10)$$

Далее можно рассчитать допустимые ошибки выведения (коррекции) по периоду обращения и большой полуоси:

$$\delta T_{\text{доп}} = \frac{\delta u_{\text{доп}} T_0^2}{2\pi T_0}; \quad (11)$$

$$\delta a_{\text{доп}} = \frac{2a_0}{3T_0} \delta T_{\text{доп}}, \quad (12)$$

где  $T_0$  — срок эксплуатации (либо интервал между коррекциями орбит КА) сети.

Требуемая частота коррекции (из-за погрешностей в наклонении и большой полуоси орбит) по аргументу широты на 4-5 порядков выше, чем по долготе восходящего узла. Вдобавок, из-за возмущений, вызванных нецентральностью гравитационного поля (4), даже при идеальном согласовании орбитальных параметров КА сети с течением времени произойдет рассинхронизация движения КА в каждой орбитальной плоскости. Следовательно, согласование орбитальных параметров КА сети с относительной точностью, превышающей  $C_{20}$ , не имеет смысла, поскольку такой порядок имеет гравитационное возмущение драконического периода [2; 7].

### Выводы

Проведенный анализ влияния ошибок выведения и возмущающих факторов на эволюцию орбитальной системы показал следующее.

1. Целесообразно строить орбитальную сеть МНС на круговых орбитах с одинаковой высотой 700...2000 км и наклонением 70...90°. Такое построение позволяет обеспечить (при нулевых ошибках выведения КА на орбиты) стабильность

сети в условиях нецентральности гравитационного поля Земли, воздействия лунно-солнечной гравитации и атмосферного сопротивления.

2. Взаимные погрешности выведения КА на орбиту по высоте и скорости являются основной причиной нарушения условий покрытия Земли зонами обслуживания. Указанные погрешности приводят к нарушению внутрисекторной структуры сети (изменению начальных значений аргументов широты). Управление другими параметрами орбит, в основном, носит одноразовый характер.

3. Согласование параметров КА сети с точностью, превышающей относительные ошибки  $10^{-3}$ , нецелесообразно, так как гравитационное вековое возмущение угловой дальности между КА имеет порядок  $C_{20} \sim 10^{-3}$ .

4. Необходимо поддержание взаимной ориентации плоскостей орбит для обеспечения глобальности обслуживания абонентов. Нарушение заданного положения КА по аргументу широты приводит к ухудшению показателей оперативности (непрерывности) обслуживания.

5. Создание МНС на основе сети сфазированных КА нецелесообразно, поскольку требует больших экономических и технических затрат на поддержание взаимного положения КА по аргументу широты из-за практической невозможности выведения КА на орбиты с нулевыми ошибками. Коррекция орбиты КА предполагает наличие соответствующего бортового оборудования (корректирующих двигательных установок с большим запасом рабочего тела, высокоточной системы ориентации и стабилизации и др.), что существенно повышает стоимость КА, а также значительно увеличивает нагрузки на бортовой комплекс управления по определению орбит, расчету и осуществлению корректирующего управления.

По результатам анализа особенностей орбитального построения МНС ВПД представляется целесообразным разработать модель ее динамики.

### Литература

1. Албул, А. С. Сравнительный анализ методов учета влияния частотно-селективных замираний в спутниковых системах связи / А. С. Албул // Вестн. Днепропетров. ун-та.— Днепропетровск: ДНУ, 2012.— Т. 2, вып. 16.— С. 73–77.— (Серия «Ракетно-космическая техника»).

2. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике / В. К. Абалакин [и др.]; под ред. Г. Н. Дубошина.— М.: Наука, 2012.— 864 с.

3. Управление космическими объектами. Методы, модели и алгоритмы решения некорректных задач навигационно-баллистического обеспечения / [К. Р. Байрамов, В. В. Бетанов, Г. Г. Ступак и др.].— М.: Радиотехника, 2012.— 360 с.

4. Назаренко, А. И. Эволюция и устойчивость спутниковых систем / А. И. Назаренко, Б. С. Скребушевский.— М.: Машиностроение.— 1979.— 445 с.

5. Можжев, Г. В. Синтез орбитальных структур спутниковых систем / Г. В. Можжев.— М.: Машиностроение, 1989.— 303 с.

6. Горбулин, В. И. Новый способ оптимизации орбитального построения глобальных спутниковых систем / В. И. Горбулин // *Вопр. электромеханики*.— 2012.— Т. 128.

7. ECSS, 2000. Space engineering. Space environment. European Cooperation for Space Standardization.— ESA-ESTEC Publications Division, ECSS-E-10-04A.

**Рецензент:** доктор техн. наук, профессор Е. С. Козелкова, Государственный университет телекоммуникаций, Киев.

О. С. Албул, М. Ф. Бабаков

### АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПОМИЛОК ВИВЕДЕННЯ ТА ЗБУРЮВАЛЬНИХ ФАКТОРІВ НА ЗМІНУ ОРБІТАЛЬНОЇ ПОБУДОВИ БАГАТОСУПУТНИКОВИХ НИЗЬКООРБІТАЛЬНИХ СИСТЕМ

Розглядається вплив негативних факторів на деградацію орбітального угруповання багатосупутникових низькоорбітальних систем. Наводяться розрахункові співвідношення як для існуючих орбітальних структур, так і для перспективних варіантів побудови. У результаті визначено умови збереження орбітальних властивостей мережі.

**Ключові слова:** багатосупутникова низькоорбітальна система; космічний апарат; орбітальна структура; збурювальні фактори.

A. S. Albul, M. F. Babakov

### ANALYSIS OF INSERTION ERRORS AND PERTURBATION FACTORS ON THE VARIATION OF THE ORBITAL STRUCTURE OF LEO MULTI-SATELLITE SYSTEMS

The influence of negative factors on the degradation of the orbital constellation of low-orbit satellite systems are considered. The ratios for existing and experimental orbital structures are provided. As a result, the conditions of orbital properties preservation of the network are determined.

**Keywords:** LEO multi-satellite system; spacecraft; orbital structure; perturbation factors.

УДК 681.518.2

А. В. ШУЛЬГА, канд. техн. наук, доцент;

Д. Н. НЕЛЮБА, В. А. СОКИРИНА,

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

## ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ РАЗРЯДНОЙ ГОРЕЛКИ МЕТАЛЛОГАЛОГЕННЫХ ЛАМП КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ НАВИГАЦИОННЫХ ПРИБОРОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Рассматриваются методика и результаты экспериментальных исследований процесса старта применяемых в приборах навигации источников излучения высокой интенсивности с галоидными добавками и влияния на этот процесс геометрических размеров используемой разрядной горелки.

Предлагаются варианты повышения надежности старта указанных источников излучения, обеспечивающие значительное улучшение световых и эксплуатационных характеристик приборов навигации при номинальных напряжениях.

**Ключевые слова:** аргон; разряд; основной электрод; электрод поджигающий; горелка; трехэлектродная конструкция; иодид металла; зажигание; электролиз.

#### Введение

При использовании металлогалогенных ламп (МГЛ) высокого давления в качестве источников излучения в навигационных системах оптического диапазона основное внимание уделяется надежности функционирования такой лампы в течение всего срока службы.

Основная проблема при эксплуатации указанных источников излучения возникает в процессе пуска. Он затруднен из-за наличия в разрядном промежутке излучающей горелки паров галоидных соединений (иодиды щелочных или редкоземельных металлов), что в момент зажигания (при

управлении пуском лампы) приводит к необходимости применять импульсы высокого напряжения. Решение этой проблемы возможно двумя способами: применением специальных импульсных зажигающих устройств (ИЗУ) и разработкой конструкций трехэлектродных разрядных горелок, которые позволяют осуществлять пуск источников излучения высокой интенсивности без ИЗУ.

**Цель статьи** — исследовать варианты снижения пускового напряжения МГЛ для обеспечения надежного зажигания и работы ламп от сети 220 и 380 В без зажигающих устройств и специальных схем включения.