

ВЫБОР МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ОРБИТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ МНОГОСПУТНИКОВОЙ НИЗКООРБИТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Е.С. Козелкова¹, В.П. Тарохтей², Ю.В. Тарохтей²

(¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков,
²ОАО «АО Научно-исследовательский институт радиоизмерений»)

В статье рассмотрена модель, позволяющая исследовать основные характеристики орбитальной структуры многоспутниковой низкоорбитальной системы.

орбитальная структура, космический аппарат, многоспутниковая низкоорбитальная система

Постановка задачи. С помощью известных методик синтеза системы космических аппаратов (КА) [1 – 6] можно выбрать несколько вариантов орбитальной структуры с близкими кинематическими характеристиками, отличающимися количеством КА, плоскостями орбит и т.д. Однако окончательный выбор баллистической структуры многоспутниковой низкоорбитальной системы (МНС) должен осуществляться на основе анализа показателей качества с различным орбитальным построением, таких как: коэффициент оперативной готовности, коэффициент связности сети, вероятность доставки сообщений за заданное время, среднее время задержки сообщений, а также с учетом всех ограничений. При этом актуальной остается задача выбора модели динамики орбитальной структуры МНС.

Целью работы является выбор модели динамики орбитальной структуры МНС.

Основная часть. Основными структурными элементами динамики орбитальной группировки КА являются [2]:

- модель динамики орбитальной структуры сети;
- блоки расчета радиовидимости абонентов и узлов сети с учетом реальных ограничений;
- блок формирования графа (матрицы) связности и маршрутизации;
- блоки статистической обработки результатов при использовании метода Монте-Карло.

Моделирование динамики орбитальной сети МНС на этапе исследования системных характеристик целесообразно проводить в условиях цен-

трального гравитационного поля без учета сопротивления атмосферы, поскольку, как указывалось ранее, основной причиной нестабильности подобных сетей являются ошибки выведения КА на орбиту. Влияние возмущающих факторов можно учесть "разрушением" фазированного движения КА в плоскостях орбит. При этом аргументы широты всех КА сети распределяются по равномерному закону в пределах $(0...360^\circ)$. Относительный дрейф плоскостей орбит задается с помощью соотношения [7]

$$\delta\Omega_{ij} = -3\pi C_{20} \frac{R_z^2}{p_0} \times n\delta i_{ij} \times \sin i_0 - 6\pi C_{20} \frac{R_z^2}{p_0} \times n\delta p_{ij} \times \cos i_0,$$

где p_0 – фокальный параметр (для круговых орбит $p_0 = r_0$); $R_z = 6378$ км – средний экваториальный радиус Земли; i – наклонение КА; n – количество КА в каждой плоскости орбиты; δi_{ij} – погрешность наклонения;

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

Орбитальная структура МНС характеризуется числом КА, входящих в ее состав, и их орбитальными параметрами. В качестве последних используются кеплеровские элементы: долгота восходящего узла Ω ; большая полуось – a (либо фокальный параметр p); наклонение – i ; эксцентриситет – e ; аргумент перигея – ω ; время прохождения перигея – τ .

Вместо τ иногда удобнее использовать начальное значение аргумента широты $u_0 = u(t)$. Поскольку для круговых орбит $e = 0$, а ω не определен.

Такие орбиты характеризуются только четырьмя параметрами: a , i , Ω , u_0 , причем

$$a = r = H + R_z,$$

где H – высота орбиты; r – радиус орбиты.

Положение и скорость КА на круговой орбите в инерциальной геоцентрической системе координат в каждый момент времени, характеризуемый аргументом широты, рассчитывается с помощью соотношений [1 – 3]:

$$x_{ni} = r(\cos \Omega \times \cos u - \sin \Omega \times \sin u_i \times \cos i);$$

$$y_{ni} = r(\sin \Omega \times \cos u + \cos \Omega \times \sin u_i \times \cos i);$$

$$z_{ni} = r \times \sin u_i \times \sin i;$$

$$V_{xni} = -V_u (\cos \Omega \times \sin u_i + \sin \Omega \times \cos u_i \times \cos i);$$

$$V_{yni} = -V_u (\sin \Omega \times \sin u_i - \cos \Omega \times \cos u_i \times \cos i);$$

$$V_{zni} = V_u \times \cos u_i \times \sin i,$$

где $V_u = \sqrt{\mu_0 / r}$ – круговая скорость КА.

Движение системы КА моделируется путем дискретного изменения в уравнении (1) [7] начального значения аргумента широты на шаг моделирования в каждом цикле:

$$u_{i+1} = u_i + \Delta u,$$

причем $\Delta u = 2\pi\Delta t/T$, где Δt – шаг моделирования по времени;

$$\delta u_{ij}(t) = -6\pi \times \frac{\Delta V_{ij}t}{VT_0} - 6\pi \times \frac{\Delta r_{ij}t}{rT_0}, \quad (1)$$

где ΔV_{ij} , Δr_{ij} – относительные ошибки выведения i -го и j -го КА по скорости и положению; T_0 – период обращения КА.

При расчете зон обслуживания, времени взаимной видимости и т.д. удобно пользоваться гринвичской системой координат с учетом вращения Земли вокруг своей оси [8]:

$$x_r = x_{и} \times \cos \gamma + y_{и} \times \sin \gamma;$$

$$y_r = y_{и} \times \cos \gamma - x_{и} \times \sin \gamma;$$

$$z_r = z_{и};$$

$$V_{xr} = V_{xi} \times \cos \gamma + V_{yi} \times \sin \gamma + \Omega_3 y_r;$$

$$V_{yr} = -V_{xi} \times \sin \gamma + V_{yi} \times \cos \gamma + \Omega_3 x_r;$$

$$V_{zr} = V_{zi},$$

где $\gamma = \Omega_3(t - t_0)$ и $\Omega_3 = 0,729211 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ – угловая скорость вращения Земли.

В качестве примера анализа свойств баллистической структуры рассмотрим результаты моделирования для сети из 36 КА, расположенных в четырех орбитальных плоскостях по 9 КА в каждой. Высота орбит $H = 1600$ км, наклонение $i = 83^\circ$, долгота восходящего узла

$$\Omega_j = \pi(j-1)/m = 45^\circ(j-1), \quad j = 1, \dots, 4.$$

Распределение КА по аргументу широты в каждой плоскости равновероятное в пределах $0 \dots 360^\circ$ (неуправляемое движение). Минимальный угол возвышения КА над горизонтом для обеспечения связи между абонентом и КА принят равным 7° .

На рис. 1 представлены гистограммы кратности покрытия Земли зонами обслуживания на различных широтах.

Анализ гистограмм позволяет судить о степени ухудшения характеристик покрытия на различных географических широтах при неуправляемом движении КА сети в течение срока эксплуатации и использовать соответствующие статистические характеристики для расчета показателей эффективности функционирования МНС.

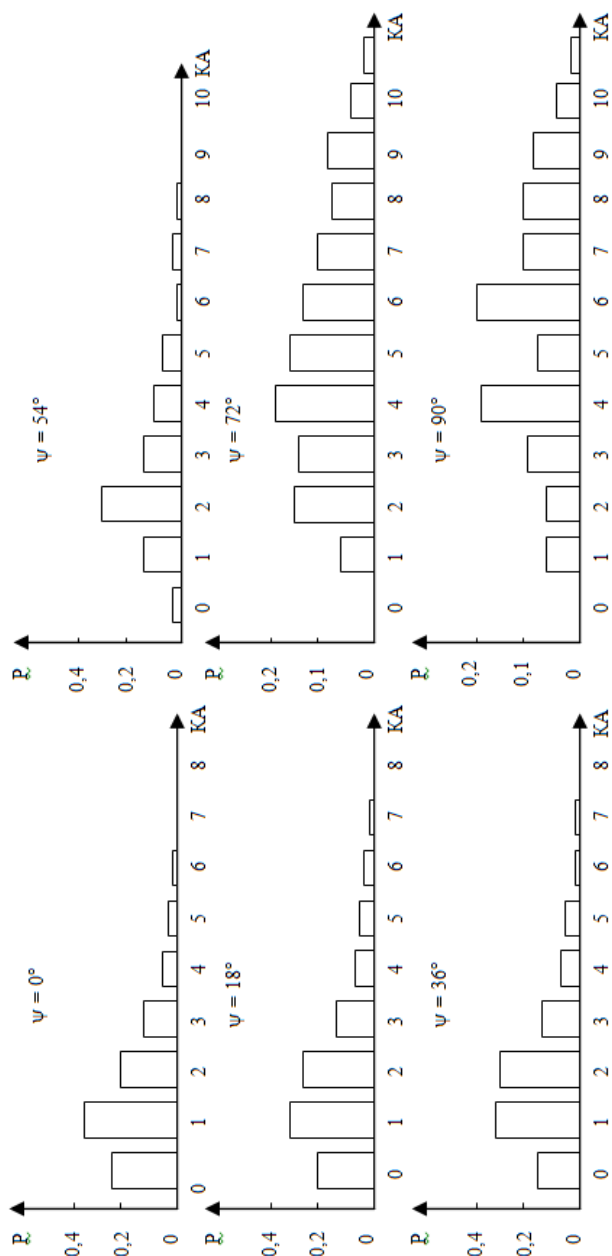


Рис. 1. Гистограммы кратности покрытия земной поверхности зонами обслуживания
(кратность покрытия: сеть (4×9) КА, $i = 83^\circ$, $H = 1500$ км, нефазированная)

Выводы. Предложенная модель позволяет исследовать важнейшие характеристики баллистической структуры (кратность зон покрытия, глобальность, связность орбитальной структуры и др.), а также влияние баллистической структуры и возмущающих факторов на показатели качества многоспутниковой низкоорбитальной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев А.А., Нестеренко О.П. *Космические системы наблюдения*. – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.
2. Можяев Г.В. *Синтез орбитальных структур спутниковых систем*. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
3. Назаренко А.И., Скребушевский В.С. *Эволюция и устойчивость спутниковых систем*. – М.: Машиностроение, 1981. – 284 с.
4. *Баллистика и навигация космических аппаратов* / Н.М. Иванов, А.А. Дмитриевский, Л.Н. Лысенко и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 296 с.
5. Баринов К.Н., Бурдаев М.Н., Мамон П.А. *Динамика и принципы построения орбитальных систем космических аппаратов*. – М.: Машиностроение, 1975. – 232 с.
6. Попович П.Р. *Баллистическое проектирование космических систем*. – М.: Машиностроение, 1987. – 240 с.
7. Козелкова Е.С. *Воздействия возмущающих факторов на стабильность баллистической структуры многоспутниковых низкоорбитальных экологических систем* // *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. – Х.: ХУПС, 2005. – Вип. 6 (6). – С. 26-29.
8. Козелков С.В., Столбов В.Ф., Тыщук С.А. *Исследование основных положений теории сверхскоростной передачи информации по радиоканалам миллиметрового диапазона волн* // *Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте*. – 1999. – Вып. № 4 (19). – С. 85.

Поступила 11.01.2006

Рецензент: доктор технических наук, профессор Л.Ф. Купченко,
Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба.