

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ОРБИТАЛЬНОГО ПОСТРОЕНИЯ МНОГОСПУТНИКОВЫХ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СЕТЕВЫХ СТРУКТУР

к.т.н. С.В. Козелков, В.Ф. Столбов
(представил д.т.н., проф. Л.Ф. Купченко)

Проведен анализ особенностей методов построения орбитальных группировок низковысотных сетевых спутниковых систем.

Основой многоспутниковых низкоорбитальных сетевых систем (МНСС) является орбитальная система космических аппаратов (КА) – совокупность упорядочено расположенных на орбитах КА, совместно выполняющих целевые задачи системы. Сеть КА характеризуется баллистической структурой – количеством и орбитальными параметрами КА, входящих в ее состав.

Выбор баллистического построения сети в значительной степени определяет большинство показателей качества МНСС и в рамках системного подхода должен осуществляться совместно с выбором основных характеристик КА, бортовых систем общего и целевого назначения. В силу большой сложности на практике определение баллистической структуры космической системы рассматривается как самостоятельная задача, решаемая с учетом заданных требований и ограничений. В ходе проектирования сети используются как строгие методы исследования, так и проектные решения на основе неформальных суждений. Процесс выбора оптимального баллистического построения МНСС содержит несколько этапов, в частности: анализ основных задач и процесса функционирования МНСС, определение показателей качества и ограничений; предварительный выбор класса орбит КА, позволяющих решать целевые задачи МНСС; синтез вариантов баллистического построения сети на основе кинематических соотношений без учета некоторых ограничений, влияния возмущающих факторов и реальной надежности КА; разработку моделей исследования влияния баллистической структуры МНСС на основные показатели качества (эффективности функционирования) МНСС; исследование динамики баллистической структуры и анализ показателей МНСС с учетом воздействия возмущающих факторов, оптимизацию орбитального построения и управления сетью КА.

Предварительный выбор класса орбит – наиболее ответственная, сложная, противоречивая задача, решаемая преимущественно неформальными методами. При выборе класса орбит КА наряду с требованиями выполнения целевых задач необходимо учитывать вопросы устойчивости баллистической структуры, а также множество ограничений и условий. Наиболее существенное значение при этом имеют [1]: расчетное время существования КА; надежность КА; энергетические возможности ракетоносителей и геогра-

фические особенности полигона запуска; возможности коррекции орбит КА; воздействие радиационных поясов Земли на работу бортовых систем.

В отличие от одиночного КА, для сети большую роль играют не только собственно параметры орбит, но и относительное положение 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 баллистической структуры сети. Поэтому выбор баллистической структуры должен обеспечивать устойчивость сети с учетом имеющихся возможностей коррекции орбит КА. Выбор класса орбит, на которых предполагается строить сеть, сводится, таким образом, к обоснованию ограничений по форме, высоте и наклонению орбит.

А. Форма орбит. Исходя из анализа целевых задач МНСС, следует отдать предпочтение круговым орбитам по следующим причинам.

1. Круговые орбиты по сравнению с эллиптическими предъявляют существенно более мягкие требования к динамическому диапазону приемо-усилительных трактов аппаратуры абонентов, поскольку вследствие постоянной высоты орбиты изменение дальности радиосвязи не зависит от географического положения пункта приема.

2. Круговые орбиты обеспечивают постоянство радиуса зоны обслуживания и равномерное ее покрытие полосами радиовидимости.

3. Эллиптические орбиты (особенно с большим эксцентриситетом) обладают более низкой стабильностью из-за разницы атмосферного торможения в перигее и апогее. В условиях воздействия возмущений и при наличии погрешностей выведения и управления стабильность взаимной ориентации орбит и сфазированность КА легче обеспечить для круговых орбит.

Б. Высота орбит. Верхняя граница высот орбит КА выбирается с учетом ограничений на энергетику радиолиний "КА - абонент", "абонент - КА" и "КА - КА"; энергетических возможностей ракет-носителей и массогабаритных характеристик КА; расположения радиационных поясов в околоземном пространстве. Если, исходя из энергетических характеристик радиолинии "КА - КА", определена максимально возможная дальность связи между КА сети $D_{1\max}$ и ставится условие возможности установления связи между всеми КА, находящимися в зоне взаимной видимости (что необходимо для обеспечения максимальной связности сети), то, в соответствии с [1]:

$$H_{\max} = \sqrt{\frac{D_{1\max}^2}{4} + (R_Z + h_{\text{атм}})^2} - R_Z,$$

где $R_Z = 6371$ км – средний радиус Земли; $h_{\text{атм}} \approx 100$ км – высота атмосферного слоя, в котором происходит наиболее сильное затухание радиоизлучения.

Ограничения на энергетику радиолинии "КА-абонент" также сужают диапазон возможных высот орбит. В [2] показано взаимное положение КА и наземного абонента, из чего следует, что

$$H_{\max} = \sqrt{D_{2\max}^2 + R_Z^2 + D_{2\max} \times R_Z \times \sin\delta_{\min}} - R_Z,$$

где δ_{\min} – минимальный угол возвышения КА над горизонтом, при котором возможна радиосвязь.

При выборе нижней границы допустимых высот следует учитывать, что при уменьшении высоты орбиты уменьшается время существования КА (при $H > 500$ км); возрастает количество КА, требуемое для обеспечения глобального покрытия поверхности Земли заданной кратности (либо для обеспечения времени ожидания связи не более заданного); увеличивается действие возмущающих сил, т.е. затрудняется поддержание заданной баллистической структуры сети КА; уменьшается длительность сеансов связи КА - абонент, определяемая при круговой орбите соотношениями:

$$\Delta t_{\text{св}} \approx \frac{T}{\pi} \times \arccos \frac{\cos \varphi_3}{\cos v}, \quad T = 2\pi \times \sqrt{\frac{a^3}{\mu_0}} = 2\pi \times \sqrt{\frac{(R_Z + H)^3}{\mu_0}}; \quad (1)$$

$$\varphi_3 = \arccos \left(\frac{R_Z \times \cos \delta}{R_Z + H} \right) - \delta; \quad v = \arccos \left(\frac{R_Z \times \cosh h_k}{R_Z + H} \right) - h_k, \quad (2)$$

где T – период обращения; μ_0 – гравитационная постоянная Земли; φ_3 – предельный центральный угол зоны обслуживания; v – угловое расстояние от абонента до трассы КА; h_k – угловая высота кульминации над горизонтом.

Тогда

$$\Delta t_{\text{св}} = 2 \sqrt{\frac{(R_Z + H)^3}{\mu_0}} \times \arccos \left\{ \frac{\cos \left[\arccos \left(\frac{R_Z \times \cos \delta}{R_Z + H} \right) \right]}{\cos \left[\arccos \left(\frac{R_Z \times \cosh h_k}{R_Z + H} \right) \right]} \right\}. \quad (3)$$

Значение δ_{\min} выбирается в зависимости от характеристик направленности антенных устройств абонентов и условий распространения радиоволн в принятом диапазоне. Величина же $h_{k \min}$ определяет угловой размер зоны обслуживания и существенно влияет на число КА в сети.

Таким образом, если для реализации функций и всех режимов работы МНСС необходима длительность сеанса связи не менее t_{\min} , нижняя граница допустимых высот орбит H_{\min} может быть определена с помощью (1) – (3).

В. Наклонение орбит. Наклонение плоскости орбит выбирается в зависимости от требований к глобальности обслуживания; высоты орбит и ширины зон обслуживания, а также с учетом географического положения полигонов запуска. Для обеспечения глобального покрытия земной поверхности должно выполняться условие $90^\circ - \varphi_3 \leq i \leq 90^\circ + \varphi_3$,

где $\varphi_3 = \arccos \left(\frac{R_Z \times \cos(\delta)}{R_Z + H} \right) - \delta = 90^\circ - \gamma - \arccos \left(\frac{(R_Z + H)}{R_Z} \times \sin(\gamma) \right)$, а γ –

ширина диаграммы направленности бортовой аппаратуры КА.

Таким образом, в результате предварительного анализа можно определить диапазоны допустимых высот ($H_{\min} \dots H_{\max}$) и наклонов ($i_{\min} - i_{\max}$)

круговых орбит КА сети. Эти значения используются в дальнейшем в качестве исходных данных при синтезе баллистической структуры сети.

Задача синтеза "идеальной" баллистической структуры МНСС состоит в определении начальных параметров орбит КА, при которых МНСС будет обеспечивать максимум показателя эффективности функционирования [3]. Основными показателями качества баллистической структуры сети могут быть:

- вероятность **k**-связности P_k (вероятность существования **k** независимых маршрутов) между двумя абонентами;
- коэффициент оперативной готовности сети $K_{ог}$;
- среднее время задержки пакета $T_{пер}$, обусловленное временем ретрансляции сигнала, аппаратурными задержками и др.

Синтез вариантов "идеальной" баллистической структуры МНСС может быть осуществлен формальными методами на основе кинематических соотношений. Заметим, что обеспечение **k**-связности между двумя абонентами сети имеет необходимым условием нахождение в зоне видимости каждого абонента не менее **k** КА в любой момент времени. Для обеспечения непрерывного глобального обзора сеть КА должна покрывать поверхность Земли стыкующимися полосами обзора шириной **b**, которые образуются зонами обзора КА, находящимися в одной плоскости [2]. При синтезе баллистической структуры сети обычно полагают, что КА сети расположены на круговых орбитах одинаковой высоты **H** и наклона **i**, в **m** плоскостях по **n** КА в каждой; распределение плоскостей орбит по долготе восходящего угла Ω_i , $i=1, \dots, m$, а также КА в каждой плоскости по аргументу широты u_j , $j=1, \dots, n$, равномерное; ширина диаграммы направленности бортовых антенн 2γ обеспечивает получение максимально возможного угла обзора φ_3 при заданном минимальном угле возвращения КА над горизонтом δ .

Таким образом для обеспечения заданной величины $tcsv_{min}$ в качестве δ необходимо принять значение минимального угла кульминации КА hk_{min} в сеансе связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Космические траекторные измерения / Под ред. П.А. Агаджанова, В.Е. Дулевица, А.А. Коростелева. – М.: Сов. радио, 1964. – 504 с.*
2. *Лебедев А.А., Нестеренко О.П. Космические системы наведения. – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.*
3. *Кучук Г.А. Метод синтезу логічної структури мережевої бази даних // Системи обробки інформації. – Х. : НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2001. – Вип. 2(12). – С. 32-36.*

Поступила 30.12.2001

КОЗЕЛКОВ Сергей Викторович, канд. техн. наук, ст. научн. сотр., зам. нач. кафедры Национальной академии обороны. В 1982 году закончил ХВВКИУ им. Н.И. Крылова. Область научных интересов – радиотехнические системы и комплексы космического назначения.

СТОЛБОВ Владимир Фридрихович, в 1982 году закончил ХВВКИУ им. Н.И. Крылова. Область научных интересов – радиотехнические системы и комплексы космического назначения.