

Помехоустойчивость межспутниковых радиоканалов низкоорбитальных малых космических аппаратов при кодовом разделении широкополосных сигналов

И. А. Козин, В. С. Куликов, Я. О. Саклаков
Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

Аннотация. Перспективным направлением развития систем космической связи является использование многоспутниковых низкоорбитальных сетевых систем на основе малых космических аппаратов. Высокая динамика и переменная топология спутниковой сети обуславливают необходимость реализации пакетной передачи информации и применения методов множественного доступа на основе кодового разделения широкополосных сигналов. Представлен подход для расчета вероятности ошибочного приема бита информации в межспутниковых радиоканалах.

Ключевые слова: малый космический аппарат, кодовое разделение, широкополосный сигнал, вероятности ошибочного приема

1. ВВЕДЕНИЕ

Перспективным направлением развития систем космической связи является использование многоспутниковых низкоорбитальных сетевых систем (МНСС). Орбитальная группировка спутников-узлов МНСС включает от нескольких десятков до нескольких сотен КА, расположенных на круговых орбитах с одинаковой высотой 500...2000 км и наклоном 70...90° в нескольких орбитальных плоскостях [1]. Наиболее высокие показатели живучести, устойчивости и пропускной способности МНСС обеспечиваются при реализации межспутниковых радиоканалов передачи информации. При этом информация между двумя абонентами передается через сеть с многократным переизлучением спутниками-узлами по радиоканалам в соответствии с выбранным маршрутом. Высокая динамика и переменная топология МНСС обуславливают необходимость реализации пакетной передачи информации и применения методов множественного доступа на основе кодового разделения широкополосных сигналов. В этих условиях определение показателей помехоустойчивости межспутниковых радиоканалов передачи информации возможно путем имитационного моделирования МНСС с использованием методики расчета вероятности ошибочного приема бита информации, изложенной в [2].

2. РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА МЕЖСПУТНИКОВЫХ РАДИОЛИНИЙ

Моделирование динамики орбитальной сети МНСС целесообразно проводить в условиях центрального гравитационного поля без учета сопротивления атмосферы, поскольку основной причиной нестабильности подобных сетей являются ошибки выведения КА на орбиту [3]. 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]. Орбитальная структура МНСС характеризуется числом КА, входящих в ее состав, и их орбитальными параметрами. Для круговых орбит используют четыре параметра [4]: наклонение i , начальное значение аргумента широты $u_0 = u(t_0)$, долгота восходящего узла Ω , радиус орбиты $r = H + R_3$, где H – высота орбиты; $R_3 = 6387$ км – радиус Земли.

Положение и скорость КА на круговой орбите в инерциальной геоцентрической системе координат в каждый момент времени, характеризуемый аргументом широты, рассчитывается с помощью соотношений [5]:

$$\begin{aligned}x_{wi} &= r(\cos \Omega \cos u - \sin \Omega \sin u_i \cos i) \\y_{wi} &= r(\sin \Omega \cos u + \cos \Omega \sin u_i \cos i); \\z_{wi} &= r \sin u_i \sin i; \\V_{xwi} &= -V_u (\cos \Omega \sin u_i + \sin \Omega \cos u_i \cos i); \\V_{ywi} &= -V_u (\sin \Omega \sin u_i + \cos \Omega \cos u_i \cos i); \\V_{zwi} &= V_u \sin u_i \sin i;\end{aligned} \quad (1)$$

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

Движение КА моделируется путем дискретного изменения в уравнениях (1) 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. T – период обращения КА.

При расчете зон обслуживания, времени взаимной видимости и т. д. удобно пользоваться гринвичской системой координат, для чего необходимо учесть вращение Земли вокруг своей оси:

$$\begin{aligned}x_{\Gamma} &= x_{и} \cos \gamma - y_{и} \sin \gamma; \\y_{\Gamma} &= y_{и} \cos \gamma + x_{и} \sin \gamma; \\z_{\Gamma} &= z_{и}; \\V_{x\Gamma} &= V_{xи} \cos \gamma + V_{yи} \sin \gamma + \Omega_3 y_{\Gamma}; \\V_{y\Gamma} &= V_{xи} \sin \gamma + V_{yи} \cos \gamma + \Omega_3 x_{\Gamma}; \\V_{z\Gamma} &= V_{zи},\end{aligned}$$

где $\gamma = \Omega_3(t - t_0)$, Ω_3 – угловая скорость вращения Земли.

Таким образом, топология сети задается путем расчета координат КА. Затем определяются расстояния при наличии радиовидимости между соседними КА для дискретных моментов времени. Знание расстояний между передатчиками и приемниками позволяет рассчитать соотношение амплитуд всех сигналов, поступающих на вход приемного устройства каждого спутника-узла.

Для расчета вероятности ошибочного приема бита информации в межспутниковых радиоканалах необходимо также знать доплеровский сдвиг частоты между принимаемыми и опорными сигналами [2], для чего нужно определить радиальные скорости спутников-узлов. Радиальная скорость представляет собой сумму проекций линейных скоростей КА на прямую, соединяющую их центры масс. Для расчета радиальной скорости необходимо поместить в центр масс одного из КА вспомогательную систему координат (СК) $X'Y'Z'$, оси которой параллельны соответствующим осям геоцентрической СК. В этой системе координаты соседнего КА:

$$X' = x_{и2} - x_{и1}, Y' = y_{и2} - y_{и1}, Z' = z_{и2} - z_{и1}$$

а проекции скорости на оси $O'X'$, $O'Y'$, $O'Z'$:

$$V_{x'} = V_{xи2} - V_{xи1}, V_{y'} = V_{yи2} - V_{yи1}, V_{z'} = V_{zи2} - V_{zи1}$$

Определить радиальную скорость можно, повернув СК таким образом, чтобы одна из осей (например, $O'X'$) совпала с прямой, соединяющей эти КА. Проекция скорости на эту ось и будет являться радиальной скоростью. Поворот СК удобно осуществить в два этапа:

1) поворот СК вокруг оси $O'Z'$ на угол α $X'Y'Z' \rightarrow X''Y''Z''$

$$\begin{aligned}V_{x''} &= V_{x'} \cos \alpha + V_{y'} \sin \alpha; \\V_{y''} &= V_{y'} \cos \alpha + V_{x'} \sin \alpha; \\V_{z''} &= V_{z'}; \\ \alpha &= \arctan \frac{Y'}{X'};\end{aligned}$$

2) поворот СК вокруг оси $O'Y''$ на угол β $X''Y''Z'' \rightarrow X'''Y'''Z'''$

$$\begin{aligned}V_{x'''} &= V_{x''} \cos \beta + V_{z''} \sin \beta; \\V_{z'''} &= V_{z''} \cos \beta + V_{x''} \sin \beta; \\V_{y'''} &= V_{y''}; \\ \beta &= \arctan \frac{Z''}{\sqrt{X''^2 + Y''^2}};\end{aligned}$$

Проекция скорости на ось $O'X'''$ и есть радиальная скорость:

$$V_{\Gamma} = V_{x'''} = \left(V_{x'} \cos \left(\arctan \frac{Y'}{X'} \right) + V_{x'} \sin \left(\arctan \frac{Y'}{X'} \right) \right) * \cos \left(\arctan \frac{Z'}{\sqrt{X'^2 + Y'^2}} \right) + V_{z'} \sin \left(\arctan \frac{Z'}{\sqrt{X'^2 + Y'^2}} \right).$$

При расчете ВОБ необходимо знать отношение энергии сигнала к спектральной плотности шума $q^2 = 2E / N_0$, связанное с отношением мощностей сигнала и шума на входе приемника $\rho^2 = P_c / P_{ш}$:

$$q^2 = 2B\rho^2,$$

где B – база широкополосного сигнала.

Мощность сигнала на входе приемника:

$$P_c = \frac{P_{\text{прд}} G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} \lambda^2}{16 \eta_{\text{афу}} \pi^2 R^2 L},$$

где $P_{\text{прд}}$ – мощность передатчика, $G_{\text{прд}}$ и $G_{\text{прм}}$ – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн, рабочая длина волны. R – протяженность радиолинии, L – коэффициент потерь в канале передачи информации, $\eta_{\text{афу}}$ – КПД антенно-фидерного устройства. Поскольку рассматривается случай слабонаправленных антенн, то $G_{\text{прд}} = G_{\text{прм}} = 1$. Коэффициент потерь в радиоканале спутник – спутник можно принять равным единице.

Мощность шумов на входе приемника складывается из шумов собственно приемника, шумов антенно-фидерного устройства и внешних шумов. Шумовая мощность собственно радиоприемника:

$$P_{\text{шпрм}} = k(N-1)T_0 \Delta f,$$

где $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ (вт*с)/град – постоянная Больцмана, N – коэффициент шума приемника, $T_0 = 300$ К, Δf – полоса пропускания приемника.

Мощность шумов антенно-фидерного тракта:

$$P_{\text{шафу}} = kT_{\text{шафу}} \Delta f,$$

где $T_{\text{шафу}} = (1 - \eta_{\text{афу}})T$, – шумовая температура антенно-фидерного тракта; $\eta_{\text{афу}}$ – КПД антенно-фидерного тракта.

Влияние внешних помех оценивается суммарной мощностью

$$P_n = kT_a \Delta f,$$

где T_a – шумовая температура антенны, определяемая промышленными, атмосферными, космическими помехами и помехами, обусловленным тепловым излучением поверхности и атмосферы Земли:

$$T_a = T_{\text{пр}} + T_{\text{атм}} + T_{\text{кос}} + T_{\text{зм}} + T_{\text{аз}}.$$

Вклад промышленных, атмосферных помех и шумов атмосферы Земли в суммарную шумовую температуру незначителен. Значения $T_{\text{кос}}$ и $T_{\text{зм}}$ для слаборазвернутых антенн определяется соотношением между шириной диаграммы направленности антенны Q_0 и углом Q_3 , под которым видна Земля из точки приема:

$$T_a = T_3 (Q_3 / Q_0)^2 + T_k ((Q_0 - Q_3) / Q_0)^2,$$

где $Q_0 > Q_3$, $T_3 = 290$ К – шумовая температура Земли, T_k – шумовая температура космоса. Угол Q_3 , можно рассчитать по формуле:

$$Q_3 = 2 \arctg \frac{R_3}{R_3 + R},$$

Исходными данными для расчета энергетического потенциала межспутниковых радиолиний являются дальности, несущие частоты, характеристики антенн, мощности передатчиков, коэффициент шума и полоса пропускания приемников, база используемых сигналов. Кроме того, используются справочные данные по шумовой температуре космоса и атмосферы. В результате расчетов определяются значения отношения энергии сигнала к спектральной плотности шума для каждого приемника, которые являются исходными для расчета вероятности ошибочного приема бита информации.

По изложенной методике были произведены расчеты вероятности ошибочного приема бита информации в межспутниковых радиоканалах МНСС для случая использования слаборазвернутых антенн. Расчет вероятности ошибочного приема бита информации приведен на рис. 1.

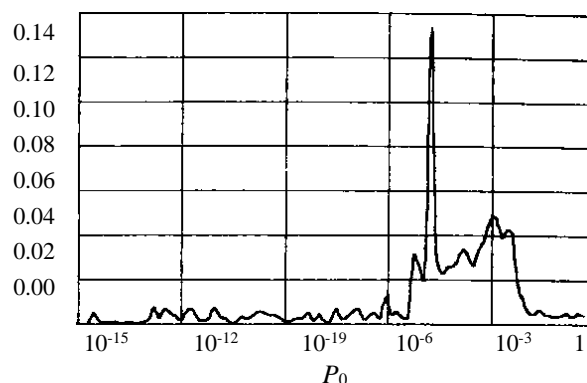


Рис. 1. Расчеты вероятности ошибочного приема бита информации в межспутниковых радиоканалах МНСС для случая использования слаборазвернутых антенн

При заданных баллистическом построении сети и параметрах приемо-передающей аппаратуры результаты расчетов вероятности ошибочного приема бита информации представлялись в виде частоты возникновения каналов связи с заданной вероятностью ошибки в них. На рисунке представлена типичная зависимость частоты возникновения каналов связи P от заданного значения вероятности ошибочного приема бита информации в радиоканале. Параметры приемо-передающей аппаратуры выбраны таким образом, чтобы обеспечить наиболее частое появление каналов связи с вероятностью ошибочного приема бита информации 10^{-5} . Достаточно большая вероятность появления каналов связи с вероятностью ошибочного приема бита информации 10^{-3} и более соответствует ситуациям, когда в зоне радиовидимости работающего на прием спутника-узла имеется источник мощного мешающего сигнала другой спутник-узел, расположенный ближе спутника-узла, осуществляющего передачу принимаемого в данный момент пакета

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты расчетов показывают, что в МНСС с течением времени происходит расфазирование сети, и возникают ситуации, когда два (или более) спутника-узла, находящиеся в одной плоскости, перемещаются на небольшом удалении друг от друга. При использовании слаборазвернутых антенн вероятности ошибочного приема бита информации в радиолиниях других спутников-узлов, попадающих в зону радиовидимости, возрастает, достигая значений $10^{-2} - 10^{-1}$. Пропускная способность данного сегмента сети падает, а обслуживаемые этим сегментом пользователи оказываются на некоторое время отключенными от сети. В приполярных областях аналогичная ситуация возникает за счет сближения спутников-узлов из разных орбитальных плоскостей.

Для обеспечения минимального значения вероятности ошибочного приема бита информации в межспутниковых радиоканалах МНСС с множественным доступом на основе кодового разделения широкополосных сигналов, необходимо стремиться обеспечить равенство амплитуд всех сигналов, поступающих на вход каждого спутника-узла. Эффективным средством минимизации вероятности ошибочного приема бита информации в межспутниковых радиоканалах МНСС при использовании слабонаправленных антенн может быть управление излучаемой мощностью. Однако при этом из-за высокой динамики сети на борту каждого спутника-узла постоянно должен обновляться альманах системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Пайсон Д. Малые спутники в современной космической деятельности // Спутниковая связь и вещание. 2017. С. 64-69.
- [2] Ключников В.Ю. Построение кластеров малых космических аппаратов // Известия вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59(6). С. 423-428.
- [3] Мальцев Г.Н., Цветков К.Ю., Родионов А.В., Акмолв А.Ф., Ефимов С.Н., Косаревич Д.В., Викторв Е.А. Концепция построения разновысотной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2011. № 630. С. 5-10.
- [4] Склад Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М., 2003. 960 с.
- [5] Кантор Л.М. Спутниковые системы связи. Справочник. М.: 2002. 356 с.