

УДК 621.391.2

© Шевченко В.А., Лапин О.Л.
Shevchenko V., Lapin O.ОЦЕНКА ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ КАНАЛОВ СВЯЗИ,
ОРГАНИЗОВАННЫХ В ЗОНЕ ОБСЛУЖИВАНИЯ МНОГОЛУЧЕВОЙ АНТЕННЫ
НЕГЕОСТАЦИОНАРНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТАESTIMATION OF ANTIJAMMING OF THE CHANNELS
ORGANISED IN A SERVICE AREA OF AN ONBOARD MULTIBEAM
ANTENNA OF NONGEOSTATIONARY SATELLITE

Аннотация. Рассмотрены каналы связи, организованные в зоне обслуживания многолучевой антенны негеостационарного космического аппарата. Получены аналитические соотношения для оценки помехозащищенности таких каналов.

Annotation. The communication channels organised in a service area of a multibeam antenna of nongeostationary satellite are considered. Expressions for an estimation of antijamming is obtained for such channels.

Ключевые слова. Антипомеха, спутниковая связь, канал, многолучевая антенна.

Key words. Anti-jamming, satellite, channel, multiple beam antenna.

Космические аппараты (КА) на негеостационарной орбите, учитывая географическое расположение Российской Федерации, уже нашли широкое распространение [1]. В свою очередь, многолучевые антенны (МЛА) находят все большее применение в спутниковой связи из-за возможности эффективно использовать энергетику бортового ретранслятора (РТР) [1,2].

В системах спутниковой связи помехозащищенность канала связи зависит от отношения мощности помехового сигнала P_n к мощности полезного сигнала P_c на входе бортового приемника. Влиянием теплового шума в таком канале принято пренебрегать [3].

Величина мощности принимаемого сигнала, как следует из уравнения радиолинии [4], определяется значениями следующих величин: эквивалентной изотропно излучаемой мощности передатчика P_G , коэффициента усиления нормированной диаграммы направленности (ДН) бортовой антенны S в направлении источника сигнала, дополнительных потерь энергии сигнала на трассе распространения $L^{\text{дон}}$.

Для вычисления дополнительных потерь в невоз-

мущенной атмосфере $L^{\text{дон}}$ в зависимости от угла места КА β и координат источника сигнала можно использовать рекомендации МСЭ-Р Р.676-6 (поглощение водяным паром и атмосферными газами), Р.618-8, Р.837-4, Р.838-2, Р.839-3, Р.678-1 (потери в дожде) [5].

Алгоритмы оценки угла места β , а также наклонной дальности r известны для КА на произвольной орбите [6,7].

Коэффициент усиления нормированной ДН однолучевой бортовой антенны S может быть определен для КА на геостационарной орбите с использованием методики, изложенной в работе [7].

Уточним ее применительно к КА на негеостационарной орбите, а затем, с учетом результатов работы [2], распространим на бортовые многолучевые антенны. Будем считать, что мощность помехового сигнала P_n складывается из мощностей N помеховых сигналов, излучаемых отдельными средствами

$$P_n = \sum_{j=1}^N P_{nj}, \quad (1)$$

где P_{nj} – мощность помехи, излучаемой j -м источником.

Шевченко Вячеслав Анатольевич – кандидат технических наук, начальник отдела военно-научного комитета Вооруженных Сил Российской Федерации, тел. +7(495)-519-98-02;

Лапин Олег Леонидович – кандидат технических наук, заместитель начальника связи Космических войск, тел. +7(495)-333-83-23.

Shevchenko Vyacheslav – the candidate of the technical sciences, chief of division of military-scientific committee of Military forces of the Russian Federation, tel. +7(495)-519 98 02;

Lapin Oleg – the candidate of the technical sciences, deputy chief of communication of Space forces, tel. +7(495)-333 83 23.

Тогда с учетом (1) можно получить

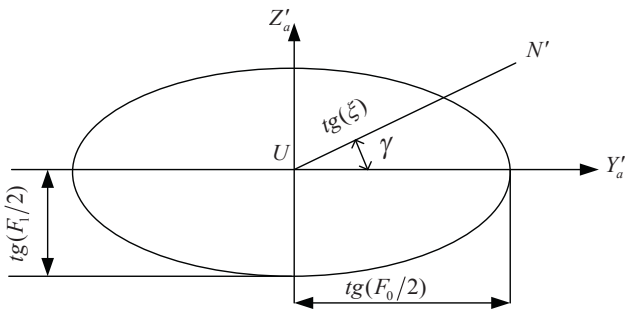
$$\frac{P_n}{P_c} = \frac{r_c^2}{(PG)_c S_c L_c^{Don}} \sum_{i=1}^N \frac{(PG)_{nj} S_{nj} L_{nj}^{Don}}{r_{nj}^2}, \quad (2)$$

где нижний индекс *c* обозначает принадлежность к земной станции (ЗС), *n_j* – к *j*-му источнику помех.

Определим теперь порядок расчета коэффициента усиления нормированной ДН антенны в направлении произвольного источника сигнала, положение которого определяется высотой над уровнем моря *H*, геодезическими широтой *B* и долготой *L*.

Положение КА на орбите зададим в гринвичской системе координат, которое на заданный момент времени можно определить путем решения системы дифференциальных уравнений возмущенного движения этого КА одной из систем элементов орбиты [6].

Коэффициент ослабления диаграммы направленности *S* антенны представим, как показано на рисунке, в виде функции аппроксимации двумерной функции вида *S=F(ξ, γ)*, где *ξ* и *γ* – угловые параметры, определяющие анализируемое направление относительно оси симметрии и плоскости большой оси сечения ДН [7].



Эллиптическое сечение ДН антенны по уровню ЗдБ

Применительно к антеннам с эллиптическим сечением ДН с углами раскрытия *F₀* и *F₁* ДН по плоскостям большой и малой осей сечения соответственно эта функция обычно задается с одним нормированным параметром

$$S = f(\delta_a), \quad (3)$$

где

$$\delta_a = \arctg \left(\frac{tg(\xi) \sqrt{\left(\frac{tg(F_0/2)}{tg(F_1/2)}\right)^2 \sin^2 \gamma + \cos^2 \gamma}}{F_0} \right) \cdot (4)$$

В случае, если ДН имеет круговое сечение (*F₀ = F₁*), выражение (2) можно существенно упростить

$$\delta_a = \xi / F_0.$$

В качестве аппроксимаций в области главного лепестка применяются соотношения [7]

$$S = \frac{\sin(2,7832\delta_a)}{2,7832\delta_a} \quad (5)$$

либо

$$S = \sqrt{\frac{2J_1(4,42\delta_a)}{4,42\delta_a}}, \quad (6)$$

где *J₁* - функция Бесселя первого порядка первого рода.

Определить *ξ* и *γ* для земной станции можно, если знать ее положение в антенной системе координат.

Эта система задается относительно системы координат КА (орбитальной подвижной системы координат) тремя угловыми параметрами – углом подъема *φ_n*, углом бокового отклонения *φ_б* и углом начального поворота антенны *σ* [7]. Величина этих углов определяется положением КА, а также выбранной точкой прицеливания максимума ДН бортовой антенны.

Для перехода от геодезических координат источника сигнала к координатам в антенной системе введем ряд промежуточных: гринвичскую систему координат и орбитальную подвижную систему координат КА [6,7].

Переход из одной системы координат в другую опишем с использованием элементарных поворотов вокруг осей *X, Y, Z* этих систем с использованием функций *R_x(φ), R_y(φ)* и *R_z(φ)*, которые принимают в качестве параметра значение угла поворота *φ* и вычисляют следующие матрицы [7]:

$$\begin{aligned} R_x(\varphi) &= \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{vmatrix}; \\ R_y(\varphi) &= \begin{vmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{vmatrix}; \\ R_z(\varphi) &= \begin{vmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

Положение ЗС в гринвичской системе координат задается следующей системой [6,7]:

$$\begin{cases} X_n = D \cos B \cos L; \\ Y_n = D \cos B \sin L; \\ Z_n = D^* \sin B, \end{cases} \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} C &= \sqrt{1 - \varepsilon(2 - \varepsilon)\sin^2(B)}; \\ D &= R_e / C + H; \\ D^* &= R_e(1 - \varepsilon)^2 / C + H. \end{aligned}$$

R_e, *ε* – соответственно экваториальный радиус и коэффициент полярного сжатия общего земного эллипсоида.

Для перевода положения ЗС из гринвичской системы координат (X_n, Y_n, Z_n) в орбитальную подвижную (X_{cn}, Y_{cn}, Z_{cn}) воспользуемся следующими соотношениями:

$$(X_{cn}, Y_{cn}, Z_{cn})^T = R_z(L_{KA})R_y(-B_{KA})(X_n, Y_n, Z_n)^T - (D_{KA}, 0, 0)^T, \quad (9)$$

где (B_{KA}, L_{KA}, D_{KA}) – координаты КА в гринвичской сферической системе координат.

Сферические координаты КА связаны с прямоугольными (X_{KA}, Y_{KA}, Z_{KA}) известными соотношениями

$$\begin{cases} B_{KA} = \arctag(Y_{KA}/X_{KA}); \\ L_{KA} = \arctag(Z_{KA}/D_{KA}); \\ D_{KA} = \sqrt{X_{KA}^2 + Y_{KA}^2 + Z_{KA}^2}. \end{cases} \quad (10)$$

С целью сокращения объема вычислений координаты КА и ЗС в гринвичской системе, полученные в качестве промежуточных, следует использовать также для оценки наклонной дальности до КА

$$r = \sqrt{(X_{KA} - X_n)^2 + (Y_{KA} - Y_n)^2 + (Z_{KA} - Z_n)^2} \quad (11)$$

и угла места

$$\beta = \arcsin\left(Y_T / \sqrt{X_T^2 + Y_T^2 + Z_T^2}\right), \quad (12)$$

где (X_T, Y_T, Z_T) – координаты КА в топоцентрической системе координат, задаваемые с использованием матрицы

$$A = \begin{bmatrix} -\sin B \cos L & -\sin B \sin L & \cos B \\ \cos B \cos L & \cos B \sin L & \sin B \\ -\sin L & \cos L & 0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

следующим выражением:

$$(X_T, Y_T, Z_T)^T = A(X_{KA} - X_n, Y_{KA} - Y_n, Z_{KA} - Z_n)^T. \quad (14)$$

Для перехода к антенной системе координат $(X_{ант}, Y_{ант}, Z_{ант})$ необходимо выполнить преобразование [7]

$$\begin{aligned} (X_{ант}, Y_{ант}, Z_{ант})^T &= \\ &= R_z(-\varphi_\sigma)R_y(\varphi_n)R_x(\sigma)(X_{cn}, Y_{cn}, Z_{cn})^T, \end{aligned} \quad (15)$$

а затем найти угловые координаты вектора анализа в системе координат антенны [7]

$$\begin{aligned} \gamma &= \arctg(Z_{ант}/Y_{ант}); \\ \xi &= \arctg\sqrt{(Y_{ант}^2 + Z_{ант}^2)/X_{ант}^2}. \end{aligned} \quad (16)$$

Углы подъема φ_n и бокового отклонения φ_σ определим, используя переход от географических координат точки прицеливания (B, L, O) к ее координатам в подвижной орбитальной системе (X_{cn}, Y_{cn}, Z_{cn}) с использованием соотношений (8) и (9). Знание положения точки прицеливания в этой системе координат делает возможным

использовать следующие выражения [7]:

$$\begin{aligned} \varphi_\sigma &= \arctg(-Y_{cn}/X_{cn}); \\ \varphi_n &= \arctg(-Z_{cn} \cos(\varphi_\sigma)/X_{cn}). \end{aligned} \quad (17)$$

Распространим теперь полученные результаты на МЛА с оптимальным заполнением. Для нее задается порядок p , соответствующий максимальному индексу лучей [2]. Каждый парциальный луч однозначно определяется индексами i и j , которые связаны следующими образом [2]:

$$\begin{cases} j = -p, -1, & i = -p, p + j; \\ j = 0, p, & i = j - p, p. \end{cases} \quad (18)$$

Для парциального луча с индексами i и j направляющие углы $\varphi_n^{(i,j)}$ и $\varphi_\sigma^{(i,j)}$ вычисляются как поправки $\Delta\varphi_n^{(i,j)}$ и $\Delta\varphi_\sigma^{(i,j)}$ к направляющим углам центрального лепестка φ_n и φ_σ с использованием следующих соотношений [2]:

$$\begin{cases} \Delta\varphi_n^{(i,j)} = \phi(i - j \sin(\pi/6)); \\ \Delta\varphi_\sigma^{(i,j)} = \phi j \cos(\pi/6), \end{cases} \quad (19)$$

где ϕ – ширина диаграммы направленности парциального угла.

Применим теперь полученные соотношения к расчету величин S_c и S_{nj} . Вначале определим парциальный луч (i, j) , в зоне обслуживания которого находится земная станция («рабочий» луч). Зону обслуживания определим как пересечение с земной поверхностью нормированной ДН парциального луча на уровне минус 3 дБ. Тогда, с учетом выражения (3), условием нахождения ЗС в зоне обслуживания «рабочего» луча будет выполнение неравенства

$$S_c^{(i,j)} < 0,5, \quad (20)$$

где $S_c^{(i,j)}$ – коэффициент усиления нормированной ДН парциального луча (i, j) в направлении ЗС.

Для решения указанной задачи предварительно следует перейти с использованием выражений (8) и (9) от географических координат ЗС к положению этой станции в системе координат КА.

Организуя цикл по возможным значениям (i, j) , которые определяются выражением (18), необходимо на каждом шаге выполнить следующие действия.

1. Используя выражение (15), перейти из системы координат КА в антенную систему координат с учетом того, что для парциального луча (i, j) углы $\varphi_n^{(i,j)}$ и $\varphi_\sigma^{(i,j)}$ должны находиться из следующих соотношений:

$$\varphi_\sigma^{(i,j)} = \varphi_\sigma + \Delta\varphi_\sigma^{(i,j)}; \varphi_n^{(i,j)} = \varphi_n + \Delta\varphi_n^{(i,j)}, \quad (21)$$

где поправки $\Delta\varphi_n^{(i,j)}$ и $\Delta\varphi_\sigma^{(i,j)}$ определяются из выражения (19), а углы φ_n и φ_σ являются направляющими углами центрального лепестка ДН.

2. С использованием выражения (16) для найденного положения земной станции в антенной системе координат определить углы ξ и γ .

3. Подставить вычисленные значения углов ξ и γ в правую часть выражения (4), а последнее в выражение (5) или (6) в зависимости от принятой аппроксимации ДН.

Расчеты по пп. 1...3 следует проводить до выполнения неравенства (20).

Определение «рабочего» парциального луча (i, j) позволяет перейти к вычислению коэффициента усиления его нормированной ДН в направлении каждого из источников помех. Для этого необходимо последовательно воспользоваться выражениями (8), (9), (15), (16) и (4), а затем аппроксимацией ДН в области ее боковых лепестков. В качестве исходных данных используются гео-

графические координаты источника помех, координаты КА в гринвичской системе координат и углы $\varphi_n^{(i,j)}$ и $\varphi_o^{(i,j)}$ для «рабочего» парциального луча МЛА.

Значения координат земной станции и источников помех в гринвичской системе, полученные в качестве промежуточных, следует также использовать для расчетов соответствующих углов места КА и наклонных дальностей до него с использованием соотношений (12)... (14) и (11) соответственно.

Таким образом, получены соотношения, которые позволяют рассчитать отношение мощности помехи к мощности сигнала P_n/P_c в каналах спутниковой связи, организованных в зоне обслуживания бортовой МЛА негостационарного КА.

Литература

1. Системы спутниковой связи с эллиптическими орбитами, разнесением ветвей и адаптивной обработкой/Под ред. Е.Ф.Камнева.-М.:ГЛОБСАТКОМ,2009.-546с.
- 2.Акимов А.А. Сахнин Л.А. Методика расчета зон покрытия спутниковой системы связи с многолучевой антенной оптимального заполнения//Техника средств связи. Серия общетехническая. Выпуск №3, 1989.-с. 128-134.
3. Simon M.K., Otmira J.K., Scholtz R.A., Levitt B.K. Spread Spectrum Communications, vol I-III, Rockville, MD: Computer Science, Maryland, 1985.
4. Спутниковая связь и вещание: Справочник.-3-е изд., перераб. и доп./В.А.Бартнев, Г.В.Болотов, ВЛ. Быков и др.; Под ред. Л.Я.Кантора.-М.: Радио и связь, 1997.-528с.
5. Ippolito L.J. Satellite communications systems engineering: atmospheric effects, satellite link design, and system.- JohnWiley & Sons Ltd. 2008.- 396 p.
6. Скребушевский Б.С. Управление полетом беспилотных космических аппаратов.- М. «Владмо», 2003. – 436с.
7. Машибиц Л.М. Компьютерная картография и зоны спутниковой связи.- 2-е изд. перераб. и доп.-М.: Горячая линия – Телеком, 2009.- 236с.

Материал поступил в редакцию 30. 05. 2010 г.