

УДК 621.391

doi: 10.53816/23061456_2025_9–10_113

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЗКОПОЛОСНОЙ НЕПРЕДНАМЕРЕННОЙ
ПОМЕХИ НА ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ
К ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ ЗАПАСУ СПУТНИКОВОЙ РАДИОЛИНИИ
ПРИ ПЕРЕДАЧЕ СИГНАЛОВ С ДВОИЧНОЙ ЧАСТОТНОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ
И НЕКОГЕРЕНТНЫМ ОБНАРУЖЕНИЕМ**

**STUDY OF THE INFLUENCE OF NARROWBAND UNINTENTIONAL
INTERFERENCE ON THE SUBSTANTIATION OF REQUIREMENTS
FOR THE ENERGY RESERVE OF A SATELLITE RADIO LINK
WHEN TRANSMITTING SIGNALS WITH BINARY FREQUENCY
MANIPULATION AND NON-COHERENT DETECTION**

Канд. техн. наук П.А. Маслаков, канд. техн. наук Д.И. Бучинский, канд. техн. наук Ю.Н. Копалов

Ph.D. P.A. Maslakov, Ph.D. D.I. Buchinsky, Ph.D. Yu.N. Kopalov

Военно-космическая академия им А.Ф. Можайского

В статье описан методический подход к расчету энергетического запаса спутниковой радиолинии «Земля-Космос» в условиях воздействия непреднамеренной шумовой узкополосной помехи. На примере сигналов с двоичной частотной манипуляцией и некогерентным обнаружением представлены зависимости получаемого уровня энергетического запаса радиолинии от коэффициента перекрытия помехи по частоте. Исследования проводились с помощью аналитико-имитационного моделирования для различных несущих частот и при разных требованиях к вероятности битовой ошибки. В рамках решения данной задачи показано, что при воздействии непреднамеренной помехи той же мощности, но сосредоточенной в части спектра сигнала, наблюдается более негативный эффект, чем при наличии помехи по всей полосе приема.

Ключевые слова: спутниковая радиолиния, энергетический запас, мощность передающего устройства, непреднамеренная помеха, коэффициент перекрытия помехи по частоте.

The article describes a methodical approach to calculating the energy reserve of the Earth-Space satellite radio link under conditions of unintentional narrow-band noise interference. Using binary frequency-shift keying and non-coherent detection signals as an example, the dependences of the obtained level of radio link energy reserve on the interference overlap coefficient by frequency are presented. The studies were conducted using analytical and simulation modeling for different carrier frequencies and with different requirements for the bit error probability. As part of the solution to this problem, it was shown that when exposed to unintentional interference of the same power, but concentrated in a part of the signal spectrum, a more negative effect is observed than when interference is present across the entire reception band.

Keywords: satellite radio link, energy reserve, transmitting device power, unintentional interference, interference frequency coverage ratio.

Введение

При проектировании спутниковых каналов связи важной задачей является расчет бюджета радиолинии, под которым понимается, в первую очередь, подробное соотношение между приемным и передающим устройством (ПРДУ) с учетом возникающих потерь, которое позволяет обеспечить прием сигнала с требуемым качеством [1, 2]. Результатом энергетического расчета является подтверждение или не подтверждение заданных условий по передаче и приему той или иной информации одной или многими Земными станциями (ЗС). При рассмотрении космических систем ретрансляции спутник-ретранслятор (СР) способен обеспечить устойчивое функционирование по крайней мере четырех различных линий связи, в том числе абонентской радиолинии «Земля–Космос». Однако с учетом постоянного усложнения электромагнитной обстановки на спутниковую радиолинию могут воздействовать непреднамеренные помехи [3–5], как во всей полосе сигнала, так и в его части, что необходимо учитывать при расчете.

Цель настоящей статьи — обоснование требуемого энергетического запаса спутниковой радиолинии «Земля–Космос» в условиях воздействия непреднамеренных узкополосных помех.

Методика расчета энергетического запаса спутниковой радиолинии

Расчет требуемой мощности ПРДУ ЗС $P_{\text{прд}}$ (дБВт) можно произвести исходя из определения эффективной изотропно излучаемой мощности (ЭИИМ), измеряемой в дБВт:

$$\text{ЭИИМ} = G_{\text{прд}} + P_{\text{прд}} - L_{\text{прд}}, \quad (1)$$

где $G_{\text{прд}}$ — коэффициент усиления (КУ) передающей антенны, дБ;

$L_{\text{прд}}$ — потери при формировании сигнала в ПРДУ, дБ.

Большинство антенн, которые используются в спутниковых радиолиниях являются зеркальными, КУ которых определяется в соответствии с выражением:

$$G = 10 \lg(q) + 20 \lg\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right),$$

где q — коэффициент использования поверхности антенны;

D — диаметр антенны, м;

λ — длина волны, м.

Мощность принятого сигнала $P_{\text{вх}}$ на входе маломощного усилителя (МШУ) приемного устройства (ПРМУ) после усиления антенной определяется как

$$P_{\text{вх}} = \text{ЭИИМ} - L_{\text{тр}} + G_{\text{прм}} - L_{\text{прм}},$$

где $L_{\text{тр}}$ — суммарные потери в радиолинии на трассе распространения, дБ;

$G_{\text{прм}}$ — КУ приемной антенны, дБ;

$L_{\text{прм}}$ — потери в тракте от выхода антенны до входа в МШУ, дБ.

Энергетический запас M спутниковой радиолинии, определяемый как разность между $P_{\text{вх}}$ и чувствительностью ПРМУ P_0 для устойчивого приема с требуемой достоверностью, должен иметь неотрицательное значение.

Чувствительность ПРМУ рассчитывается по формуле [6]:

$$P_0 = k + T + B_c + \frac{C}{N}, \quad (2)$$

где k — постоянная Больцмана (дБВт/кГц);

T — эквивалентная шумовая температура системы, выражаемая в дБ относительно 1 К;

B_c — ширина полосы частот сигнала, обычно совпадающая с полосой пропускания ПРМУ (дБ относительно 1 Гц),

$\frac{C}{N}$ — требуемое отношение сигнал/(шум+помеха) пересчитанное ко входу МШУ, дБ.

При функционировании системы спутниковой связи (ретрансляции) могут воздействовать непреднамеренные узкополосные помехи в части полосы частот. Шумовая помеха в части полосы имеет равномерное распределение общей мощности шума $P_{\text{ш}}$ в некотором диапазоне частот с полосой $B_{\text{ш}}$, являющейся частью общей полосы частот спутниковой радиолинии B_c , $\rho = B_{\text{ш}}/B_c$. Коэффициент ρ в статье обозначен как коэффициент перекрытия помехи по частоте (КППЧ). При этом спектральная плотность мощности (СПМ) помехи $J_{\text{ш}}$ определяется в соответствии с выражением [7]:

$$\frac{P_{\text{ш}}}{B_{\text{ш}}} = \frac{P_{\text{ш}}}{B_c} \cdot \frac{B_c}{B_{\text{ш}}} = \frac{J_{\text{ш}}}{\rho}.$$

Таким образом, СПМ шумовой помехи в части полосы J_0 может быть представлена в виде двух уровней

$$J_{\Pi} = \begin{cases} \frac{P_{\Pi}}{\rho B_c} & \text{в полосе } \rho B_c; \\ 0 & \text{в полосе } (1-\rho)B_c. \end{cases}$$

Помеха в части полосы может быть сосредоточена на нескольких участках частотного диапазона, разнесенных на некоторый интервал частот.

Если для модуляции применяется двоичная частотная манипуляция с некогерентными обнаружением, то средняя вероятность ошибки (СВО) на бит будет равна:

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_b}{2N_0}\right).$$

Параметр ρ указывает часть полосы сигнала, в которой присутствуют непреднамеренные шумовые помехи, то есть для случая, когда источник шумовых помех, воздействуя в части полосы частот полезного сигнала, увеличивает в ней мощность помех. Например, покрывая полосу $\Delta f_{\Pi} = \rho \Delta f_c$, источник помех увеличивает СПМ шумов J_{Π} до уровня J_{Π}/ρ . В таком случае средняя полученная мощность помех будет постоянной и будет равна $P_{\Pi \text{ ср}} = J_{\Pi} / \Delta f_c$.

Если СПМ источника непреднамеренных шумовых помех значительно больше СПМ шума, то справедливо предположение [1]:

$$P_{\text{ош}} \approx \frac{\rho}{2} \exp\left(-\frac{\rho E_b}{2J_{\Pi}}\right).$$

Параметр $\frac{C}{N}$ определяется выражением:

$$\frac{C}{N} = \frac{E_b}{J_{\Pi}} + R - B_c, \quad (3)$$

где $\frac{E_b}{J_{\Pi}}$ — требуемое отношение энергии информационного бита к односторонней спектральной плотности мощности помех для заданной достоверности приема, дБ;

R — скорость передачи информации, выраженная в децибелах относительно скорости 1 бит/с, дБбит/с.

Используя выражение (3), выражение (2) можно записать в следующем виде:

$$P_0 = k + T + \frac{E_b}{J_{\Pi}} + R.$$

Таким образом, из формулы (1) можно выразить с использованием описанных выше выражений, требуемый энергетический запас радиолинии в условиях воздействия непреднамеренных помех:

$$\begin{aligned} M(\text{дБ}) = & P_{\text{прд}} + 10 \lg(q_{\text{прд}}) + 20 \lg\left(\frac{\pi D_{\text{прд}}}{\lambda}\right) - \\ & - L_{\Sigma} + 10 \lg(q_{\text{прм}}) + 20 \lg\left(\frac{\pi D_{\text{прм}}}{\lambda}\right) - \\ & - 10 \lg(kT) - 10 \lg(R) + \left(\frac{E_b}{J_{\Pi \text{ треб}}}\right), \end{aligned}$$

где $q_{\text{прд}}$ и $q_{\text{прм}}$ — коэффициенты использования поверхности антенны передающего и ПРМУ соответственно;

$D_{\text{прм}}$ и $D_{\text{прд}}$ — диаметр приемной и передающей антенны, м.

Исходя из данного уравнения видно, что требуемая мощность ПРДУ ЗС определяется параметрами модема, несущей частотой, применяемыми антеннами, уровнем помех в радиолинии и различными потерями, в том числе вызванными погодными условиями.

Общие суммарные потери определяются в соответствии с формулой:

$$\begin{aligned} L_{\Sigma}(\text{дБ}) = & L_{\text{тр}} + L_{\text{прд}} + \\ & + L_{\text{пол}} + L_{\text{н прд}} + L_{\text{н прм}} + \\ & + L_{\text{прм}} + L_{\text{д}} + L_{\text{а}} + L_{\text{обл}} + L_{\text{доп}}, \end{aligned}$$

где $L_{\text{пол}}$ — потери, связанные с различием в поляризации;

$L_{\text{н прд}}$ и $L_{\text{н прм}}$ — потери при наведении антенн ПРДУ и ПРМУ;

$L_{\text{д}}$ — потери при дожде (граде и снеге);

$L_{\text{а}}$ — потери в газах атмосферы;

$L_{\text{обл}}$ — потери в условиях облачности;

$L_{\text{доп}}$ — дополнительные неучтенные потери.

Слагаемые из описанного выше выражения зависят от диапазона частот, обладают своей спецификой, которую необходимо учитывать

при расчете потерь, при распространении сигнала. Например, антенна СР может наводиться не непосредственно на ЗС, а на центр некоторой зоны обслуживания антенны СР по половинной мощности. При этом ЗС могут находиться в любой точке этой зоны, в том числе и на ее границе, поэтому потери, вызванные ошибками наведения антенны СР целесообразно оценить, как 3 дБ [3, 8].

Результаты исследования влияния параметров спутниковой радиолинии на требования к энергетическому запасу

В качестве исходных данных для тестового расчета требуемого энергетического запаса использованы следующие параметры радиолинии:

– несущая частота — 14 ГГц;

– диаметр передающей антенны — 4 м, приемной — 0,4 м;

– $q_{\text{прм}} = q_{\text{прд}} = 0,55$;

– $L_{\text{н прд}} = 0,5$ дБ;

– $L_{\text{н прм}} = 3$ дБ;

– $L_{\text{прд}} = 2$ дБ;

– $L_{\text{прм}} = 1$ дБ;

– $T = 400$ К;

– дальность связи — 40586 км;

– $R = 2$ Мбит/с;

– $B_{\text{с}} = 2,93$ МГц.

Из полученных результатов моделирования (рис. 1–3) следует, что при уменьшении значения КППЧ средняя мощность помехи сохраняется, но воздействие помехи осуществляется в части полосы частот сигнала и СВО на бит увеличивается, что приводит к необходимости повышения требований к энергетическому запасу радиоли-

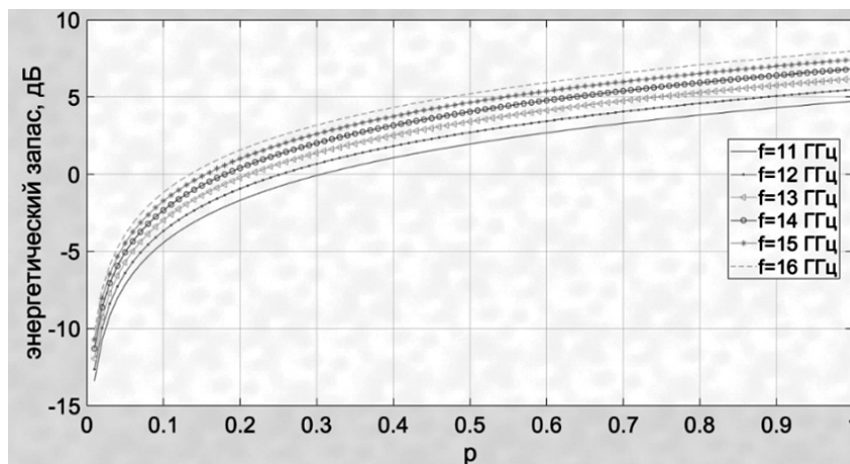


Рис. 1. Зависимость требуемого энергетического запаса спутниковой радиолинии от КППЧ для различных несущих частот

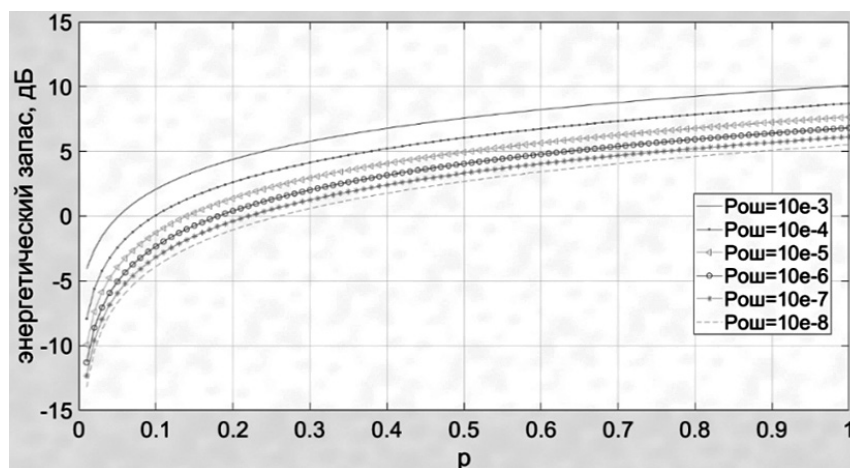


Рис. 2. Зависимость требуемого энергетического запаса спутниковой радиолинии от КППЧ при различных требованиях допустимой СВО на бит

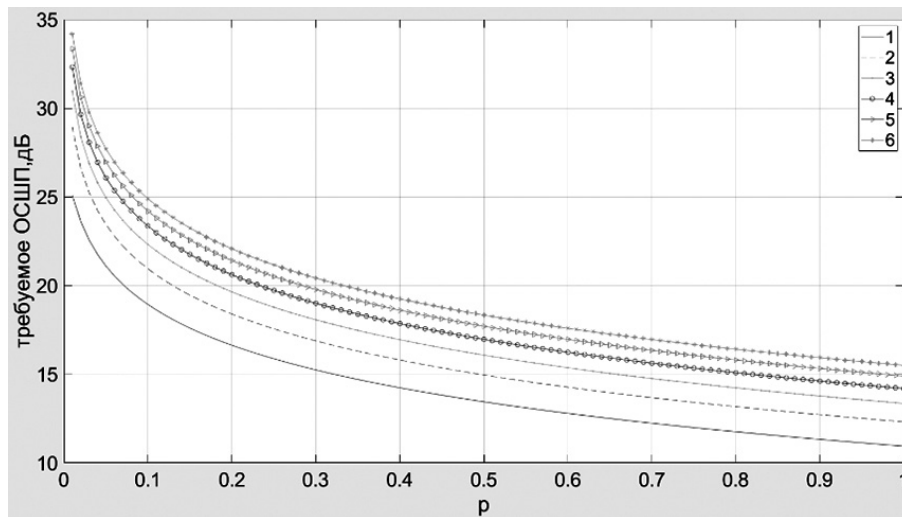


Рис. 3. Зависимости требуемого отношения сигнал/(шум+помеха) для спутниковой радиолинии с двоичной частотной манипуляцией и некогерентным обнаружением от КППЧ

нии. Таким образом, негативное влияние на полезный сигнал узкополосных помех оказывается существенным и эффект воздействия зависит от КППЧ.

Кривая 1 на рис. 2 соответствует значению $P_{\text{ош}} = 10^{-3}$; кривая 2 — $P_{\text{ош}} = 10^{-4}$; кривая 3 — $P_{\text{ош}} = 10^{-5}$; кривая 4 — $P_{\text{ош}} = 10^{-6}$; кривая 5 — $P_{\text{ош}} = 10^{-7}$; кривая 6 — $P_{\text{ош}} = 10^{-8}$.

То есть при снижении требований к вероятности битовой ошибки, снижаются и требования к энергетическому запасу. Если возникает ситуация, когда КППЧ неизвестен и он может принимать любое значение в диапазоне от 0 до 1, то можно предположить, что распределение параметра ρ может соответствовать как равномерному закону, так и усеченному нормальному, тогда

требования к энергетическому запасу радиолинии будут описываться гистограммой, представленной на рис. 4.

Как видно из приведенной гистограммы, для заданных исходных данных при случайном распределении КППЧ требуемый дополнительный энергетический запас составляет до 5 дБ.

Заключение

Представленный в статье методический подход к обоснованию энергетического расчета спутниковой радиолинии учитывает влияние непреднамеренной помехи в части полосы частот. Показано, что воздействие узкополосных помех, которые имеют спектральные составляющие,

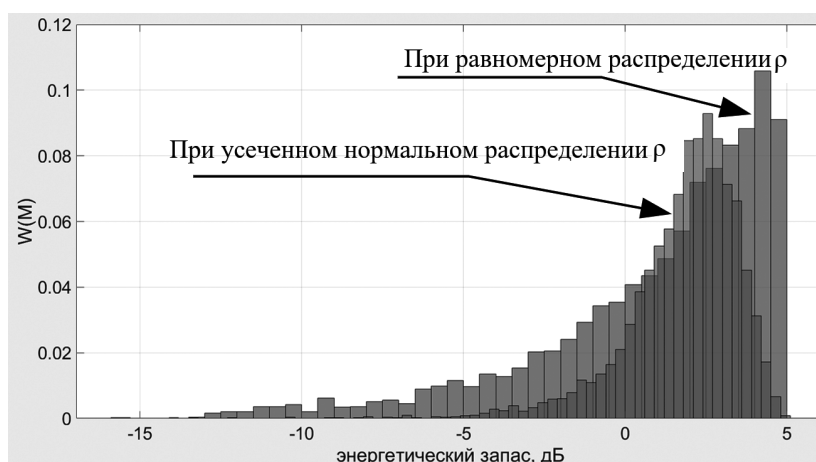


Рис. 4. Гистограммы распределения требований к энергетическому запасу спутниковой радиолинии для случая распределения КППЧ по равномерному и усеченному нормальному закону

сосредоточенные в части полосы частот сигнала, отличается от случая наличия помехи во всей полосе сигнала. Степень этого различия зависит от соотношения полосы частот помехи к полосе частот полезного сигнала.

Описанный подход позволяет на примере сигнала с двоичной частотной манипуляцией и некогерентным обнаружением учесть необходимость введения дополнительного энергетического запаса, которой позволит нивелировать негативное воздействие узкополосных помех. Для уменьшения влияния воздействия данных помех необходимо применять помехоустойчивое кодирование и перемещение.

Список источников

1. Склир Бернард. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: Пер. с англ. изд. 2-е испр. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1103 с.

2. Кукк К.И. Спутниковая связь: прошлое, настоящее. Будущее. М.: Горячая линия – Телеком, 2019. 256 с.

3. Маслаков П.А., Вознюк В.В. Методика оценивания шумовой добротности приемных систем наземных комплексов радиомониторинга спутниковой связи // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2019. Вып. 9–10. С. 18–24.

4. Паршуткин А.В., Маслаков П.А. Исследование помехоустойчивости современных стандартов спутниковой связи к воздействию нестационарных помех // Труды СПИИРАН. 2017. № 4 (53). С. 159–177.

5. Вознюк В.В., Маслаков П.А. Влияние неточности наведения зеркальных антенн спутниковой радиолонии на требования к мощности радиопередающего устройства VSAT -терминала // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2020. № 7–8 (145–146). С. 30–37.

6. Ерохин Г.А., Мандель В.И., Нестеркин Ю.А. и др. Методика расчета энергетического запаса радиолонии «Космический аппарат – станция» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018. Т. 5, № 1 (201). С. 65–74.

7. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. и др. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью. М.: Радио и связь, 2003. 640 с.

8. Космические системы ретрансляции: монография; под ред. А.В. Кузовникова. М.: Радиотехника, 2017. 448 с.

References

1. Sklyar Bernard. Digital Communications. Theoretical Foundations and Practical Applications: trans. from English. 2nd ed. corrected. M.: Williams Publishing House, 2003. 1103 p.

2. Kukk K.I. Satellite Communications: Past, Present. Future. M.: Goryachaya Liniya – Telecom, 2019. 256 p.

3. Maslakov P.A., Voznyuk V.V. Methodology for estimating the noise quality factor of receiving systems of ground-based satellite communication radio monitoring systems // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2019. No 9–10. Pp. 18–24.

4. Parshutkin A.V., Maslakov P.A. Study of noise immunity of modern satellite communication standards to the effects of non-stationary interference // Proceedings of SPIIRAS. 2017. No 4 (53). Pp. 159–177.

5. Voznyuk V.V., Maslakov P.A. The Impact of Inaccuracy in Pointing of Satellite Radio Link Mirror Antennas on the Power Requirements of a VSAT Terminal Radio Transmitter // Issues of Defense Technology. Series 16. Technical Means of Countering Terrorism. 2020. No 7–8 (145–146). Pp. 30–37.

6. Erokhin G.A., Mandel V.I., Nesterkin Yu.A. et al. Methodology for Calculating the Energy Reserve of the «Spacecraft – Station» Radio Link // Rocket and Space Instrumentation and Information Systems. 2018. Vol. 5, No 1 (201). Pp. 65–74.

7. Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.E. Noise immunity of radio communication systems with signal spectrum expansion by modulation of the carrier with a pseudo-random sequence. M.: Radio and Communications, 2003. 640 p.

8. Space Relay Systems: monograph; ed. by A.V. Kuzovnikov. M.: Radio Engineering, 2017. 448 p.