

SPACE TECHNOLOGY AND ENGINEERING

UDC 621.396.946

Lyakhov A.V., Kasyanenko N.G. Evaluation of power secrecy of a satellite communication system using computer modeling

Оценка энергетической скрытности системы спутниковой связи при помощи компьютерного моделирования

Lyakhov Alexey Vladimirovich,

Ph.D. of Engineering Sciences. Associate Professor at the Department of Computational Mathematics and Cybernetics of the North Caucasus Federal University. Stavropol.

Kasyanenko Natalia Georgievna,

Ph.D. of Engineering Sciences, Docent. Associate Professor at the Department of Information Technology of the RTU MIREA branch. Stavropol.

Ляхов Алексей Владимирович,

кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной математики и кибернетики Северо-Кавказского федерального университета, г. Ставрополь

Касьяненко Наталья Георгиевна,

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий филиала РТУ МИРЭА, г. Ставрополь.

Abstract. *The purpose of this article is to demonstrate the feasibility of simultaneously ensuring not only the required noise immunity but also the energy stealth of satellite communication systems with a reduced carrier frequency in the 30 to 100 MHz range from signal detection when the radio detection receiver is located close to the satellite earth station receiver in dual reception. The main results of the study are presented in the form of data obtained during a computational experiment in MATLAB to estimate the energy stealth coefficient of the satellite communication system, as well as the coefficient and radius of spatial correlation of signals received by the antennas. This publication differs from others similar in this topic in that, for the first time, the energy stealth coefficient of a satellite communication system in dual reception has been estimated taking into account the possibility of fast correlated fading in the radio detection and reception channels according to the generalized Rayleigh law (Rice's law). The application of these results relates to the validation of initial data required for calculations to validate the parameters of advanced satellite communication systems using spatially diverse reception on two antennas, taking into account their simultaneous compliance with both noise immunity and communication security requirements. The obtained results may be of interest to researchers and applicants conducting research in the field of satellite communications.*

Keywords: *satellite communication system, low-frequency satellite communication systems, spatially diverse reception on two antennas, generalized Rayleigh fading, Rician fading, numerical methods, energy secrecy coefficient, spatial correlation coefficient of signals, spatial correlation radius of signals.*

Аннотация. *Цель статьи – показать возможность одновременного обеспечения не только требуемой помехоустойчивости, но и энергетической скрытности спутниковых систем связи с пониженной несущей частотой в диапазоне от 30 до 100 МГц от обнаружения сигналов при близком размещении приемника радиообнаружения к приемнику земной станции спутниковой связи при сдвоенном приеме. Основные результаты исследования представлены в виде данных, полученных в ходе вычислительного эксперимента в MATLAB по оценке коэффициента энергетической скрытности спутниковой системы связи, а также коэффициента и радиуса пространственной корреляции сигналов, принятых антеннами. Отличие данной публикации от других, схожих по теме заключается в том, что впервые оценка коэффициента энергетической скрытности спутниковой системы связи при сдвоенном приеме выполнена с учетом возможности возникновения в каналах радиообнаружения и приема*

быстрых коррелированных замираний по обобщенному релейскому закону (закону Райса). Область применения результатов связана с обоснованием исходных данных, необходимых для проведения расчетов по обоснованию параметров перспективных спутниковых систем связи, использующих пространственно-разнесенный прием на две антенны, с учетом одновременного обеспечения ими требований как по помехоустойчивости, так и по скрытности связи. Полученные результаты могут представлять интерес для научных работников и соискателей, ведущих научные исследования в области спутниковой связи.

Ключевые слова: *спутниковая система связи, низкочастотные системы спутниковой связи, пространственно-разнесенный прием на две антенны, обобщенные релейские замирания, райсовские замирания, численные методы, коэффициент энергетической скрытности, коэффициент пространственной корреляции сигналов, радиус пространственной корреляции сигналов.*

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент.
Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

Введение

В настоящее время спутниковые системы связи (ССС) обеспечивают основные каналы радиосвязи применительно к стратегическому звену государственного управления. Именно эти ССС обеспечивают связь с удаленными пунктами органов государственной власти, дипломатическими представительствами Российской Федерации в других странах, передачу команд боевого управления подразделениям силовых и специальных ведомств, дислоцированных за рубежом. Поэтому к таким ССС предъявляются повышенные требования по безопасности, помехоустойчивости и скрытности.

Традиционно под *скрытностью* радиоэлектронного устройства понимают его способность противостоять мерам радиоразведки, при этом энергетическая скрытность характеризует способность противостоять мерам, направленным на обнаружение сигнала разведывательным приемным устройством [1].

Известен способ обеспечения энергетической скрытности ССС от обнаружения сигналов при близком (на удалении не более 10 км) размещении приемника (ПРМ) радиообнаружения средства радио- и радиотехнической разведки (РПТР) к ПРМ земной станции спутниковой связи (ЗсСС) [2]. Однако этот способ предполагает: 1) отказ от использования в радиолинии «вниз» «искусственный спутник Земли (ИСЗ)-ЗсСС» традиционных несущих частот $f_0 = 1...10$ ГГц и переход на частоты $f_0 = 30...100$ МГц, именуемые пониженными несущими частотами (ПНЧ); 2) использование в ЗсСС пространственно-разнесенного приема на четыре приемные антенны. Последнее обстоятельство является существенным ограничивающим фактором внедрения известного способа [2], т. к. расстояние d между соседними антеннами при их линейном эквидистантном разнесении может достигать сотен и даже тысячи метров, а общие размеры такой приемной антенной системы (АС) – нескольких километров. В этой связи большой интерес представляет случай использования в ЗсСС пространственно-

разнесенного приема на две приемные антенны. Кроме того, известный способ [2] не учитывает возможность возникновения в каналах радиобнаружения и приема быстрых коррелированных обобщенных релейевских (райсовских) замираний принимаемых сигналов.

Целью статьи является показать возможность одновременного обеспечения требуемой помехоустойчивости и энергетической скрытности ССС при близком размещении ПРМ радиобнаружения средства РРТР к ПРМ ЗсСС в диапазоне ПНЧ $f_0 = 30...100$ МГц при пространственно-разнесенном приеме на две приемные антенны и наличии коррелированных замираний по обобщенному релейевскому закону (закону Райса) в каналах радиобнаружения и приема.

Возникновение таких замираний обусловлено известными [3] особенностями распространения радиоволн (РРВ) диапазона частот от 30 до 100 МГц в ионосфере, заключающимися в том, что в нормальной ионосфере электронная концентрация (ЭК) $N_i = \bar{N} + \Delta N_i$ содержит флуктуации ΔN_i относительно среднего (фонового) значения \bar{N} (рисунок 1).

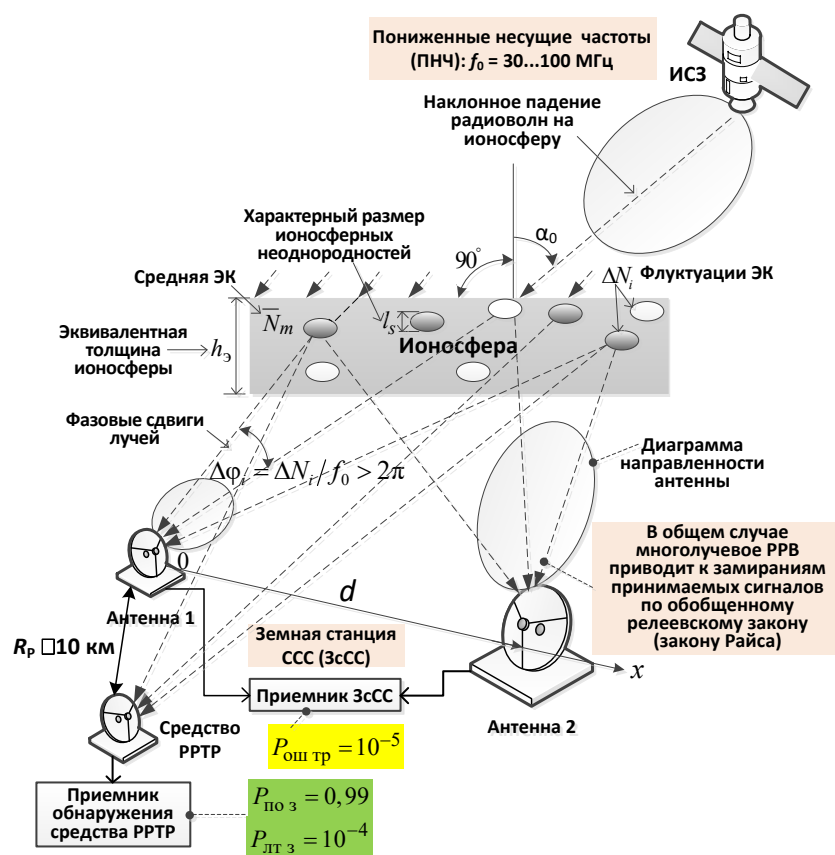


Рисунок 1 – Модель размещения передатчика и приемника спутниковой радиосвязи с пониженной несущей частотой при близком размещении приемника радиобнаружения и пространственно-разнесенного приема на две антенны

Вследствие этого, при транссионосферном РРВ с ПНЧ до $f_0 = 30 \dots 100$ МГц через неоднородную ионосферу к ПРМ ЗсСС приходит множество ($i = 1 \dots M$) рассеянных неоднородностями ЭК (ΔN_i) лучей с относительными фазовыми сдвигами $\Delta \varphi_i \sim \Delta N_i / f_0$. Значения фазовых сдвигов $\Delta \varphi_i$ определяют условия возникновения интерференционных быстрых замираний по обобщенному релейскому закону (закону Райса) ($0 < \Delta \varphi_i \leq 2\pi$) или релейского ($\Delta \varphi_i \gg 2\pi$) типа, причем райсовские замирания могут быть произвольной глубины. При традиционно используемых в ССС несущих частотах $f_0 = 1 \dots 10$ ГГц относительные фазовые сдвиги лучей отсутствуют (т.к. $\Delta \varphi_i \sim \Delta N_i / f_0 = 0$), поэтому интерференционные быстрые замирания принимаемых сигналов не возникают.

Глубину райсовских замираний принимаемых сигналов принято количественно оценивать при помощи параметра Райса γ^2 , который определяется как отношение мощности регулярной (не случайной) составляющей принимаемого P_p сигнала к мощности флуктуационной (случайной) $P_{фл}$ составляющей $\gamma^2 = P_p / P_{фл}$ [4]. Таким образом, параметр Райса может принимать произвольные значения $0 \leq \gamma^2 \leq \infty$. Причем параметр Райса равен нулю ($\gamma^2 = 0$) при релейских замираниях. Если же замирания принимаемых сигналов отсутствуют ($P_{фл} = 0$), то параметр Райса становится равным бесконечности ($\gamma^2 = \infty$).

С целью компенсации отрицательных эффектов, возникающих при приеме сигналов с быстрыми замираниями в ЗсСС в рамках известного способа повышения энергетической скрытности ССС [2] предлагается использовать пространственно-разнесенный прием сигналов на четыре антенны. Реализовать тот же самый подход в ПРМ радиообнаружения невозможно по причине ограничений на массогабаритные характеристики средства РРТР. Поэтому в ПРМ радиообнаружения вынужденно используется прием на одну антенну.

В статье [2] количественная оценка энергетической скрытности ССС применительно к радиолинии «вниз» «ИСЗ-ЗсСС», с учетом близкого (на удалении не более 10 км) размещения ПРМ радиообнаружения средства РРТР, производилась путем вычисления коэффициента энергетической скрытности (КЭС) $\gamma_{эс}$ по формуле:

$$\gamma_{эс} = h_{рз}^2 / h_{трn}^2 \text{ или } (\gamma_{эс})_{дБ} = (h_{рз}^2)_{дБ} - (h_{трn}^2)_{дБ}, \quad (1)$$

где: $h_{рз}^2$ – энергетическое отношение сигнал-шум (ОСШ) на входе ПРМ радиобнаружения средства РРТР, определяемое из условия достижения заданной вероятности правильного обнаружения $P_{поз} = 0,99$ сигнала ССС при заданной вероятности ложной тревоги $P_{лтз} = 10^{-4}$; $h_{трn}^2$ – энергетическое ОСШ на входе ПРМ ЗсСС, использующего пространственно-разнесенный прием сигналов на n антенн ($n = 4$), необходимое для обеспечения требуемой вероятности ошибки приема бита информации $P_{оштр} = 10^{-5}$. При этом условие обеспечения энергетической скрытности ССС записывается в виде:

$$\gamma_{эс} = h_{рз}^2 / h_{трn}^2 \geq 1 \text{ или } (\gamma_{эс})_{дБ} = (h_{рз}^2)_{дБ} - (h_{трn}^2)_{дБ} \geq 0. \quad (2)$$

Результаты, представленные в статье, основаны на исследованиях авторов, которые были опубликованы в журнальных статьях только частично [5].

1. Постановка задачи

Дано: С геостационарного ИСЗ, излучается простой сигнал на несущей частоте, принадлежащей диапазону ПНЧ $f_0 \in 30 \dots 100$ МГц (рисунок 1).

Угол α трансионосферного РРВ относительно вертикали (зенитный угол) составляет 65° .

ПРМ радиобнаружения средства РРТР расположен на одной высоте при малом удалении $R_p \leq 10$ км от ПРМ ЗсСС.

В ПРМ радиобнаружения реализована схема оптимальной некогерентной (НК) обработки сигналов с флуктуирующей начальной фазой. Заданные значения вероятности правильного обнаружения $P_{по}$ сигнала ССС и ложной тревоги $P_{лт}$ равны $P_{поз} = 0,99$, $P_{лтз} = 10^{-4}$. При этом вероятность правильного обнаружения сигнала ССС определяется уравнением обнаружения [6]:

$$P_{по} = Q \left[g_1(h^2, \gamma^2), h_{01}(h^2, \gamma^2, P_{лт}) \right], \quad (3)$$

где $Q(g_1, h_{01})$ – функция Маркума от аргументов

$$g_1(h^2, \gamma^2) = \left[2h^2\gamma^2 / (1 + \gamma^2 + h^2) \right]^{1/2} \quad \text{и}$$

$h_{01}(h^2, \gamma^2, P_{\text{ПТ}}) = \left[2 \ln(P_{\text{ПТ}}^{-1}) (1 + \gamma^2) / (1 + \gamma^2 + h^2) \right]^{1/2}$, которые должны быть неотрицательными вещественными числами ($g_1, h_{01} \geq 0$); γ^2 – параметр Райса; h^2 – энергетическое ОСШ на входе ПРМ радиобнаружения средства РРТР.

Используемая в формуле (3) функция Маркума определяется выражением:

$$Q(g_1, h_{01}) = \int_{h_{01}}^{\infty} x \exp\left[-(x^2 + g_1^2)/2\right] I_0(g_1 x) dx,$$

где $I_0(g_1 x)$ обозначает модифицированную функцию Бесселя первого рода нулевого порядка. Зависимость между параметром Райса γ^2 и среднеквадратическим отклонением (СКО) фазового фронта волны σ_φ (радианы) в радиоканале с транссионферным распространением радиоволн описывается выражениями вида [7]:

$$\gamma^2 = P_p / P_{\text{фл}} = 1 / [\exp(\sigma_\varphi^2) - 1], \quad (4)$$

$$\sigma_\varphi \approx \sqrt[4]{\pi} (80,8 \pi / c) \sqrt{l_s h_\varnothing \sec \alpha} (\sigma_{\Delta N} / f_0). \quad (5)$$

В формуле (5) использованы следующие обозначения: $c = 3 \cdot 10^8$ – скорость света, м/с; $l_s \approx 400$ – характерный размер ионосферных неоднородностей, м; $h_\varnothing \approx 2,5 \cdot 10^5$ – эквивалентная толщина ионосферы, м, со средней ЭК, равной ее максимальному значению $\bar{N}(h_m) = \bar{N}_m = (2 \dots 4) \cdot 10^{12}$, эл/м³; $\bar{N}(h_m) = \bar{N}_m$ – максимальная средняя ЭК в слое F ионосферы (на высоте $h = h_m$ максимума ионизации), эл/м³; $\sigma_{\Delta N} = (2 \dots 4) \cdot 10^9$ – СКО флуктуаций ЭК в неоднородностях ионосферы, эл/м³; α – угол транссионферного распространения радиоволн относительно вертикали (зенитный угол), градусы; f_0 – несущая частота, Гц.

Требуемая вероятность ошибки приема бита информации в приемнике ЗсСС составляет $P_{\text{ош тр}} = 10^{-5}$. В ПРМ ЗсСС используется пространственно-разнесенный НК прием сигналов на две антенны при наличии коррелированных замираний принимаемых сигналов по обобщенному релеевскому закону (закону Райса).

Коэффициент пространственной корреляции сигналов, принятых антеннами, разнесенными на расстояние d , м, определяется соотношением [8]:

$$R = \exp\left[-(d/d_{cor})^2\right], \quad (6)$$

где d_{cor} – радиус корреляции принимаемых сигналов, м, вычисляемый по формуле:

$$d_{cor} = l_s / \sigma_\varphi = l_s / \left[\sqrt[4]{\pi} (80,8\pi/c) \sqrt{l_s h_3 \sec \alpha} (\sigma_{\Delta N} / f_0) \right]. \quad (7)$$

Из выражений (6) и (7) следует, что принятые антеннами сигналы будут некоррелированными, если антенны разнести в пространстве на расстояние $d \geq 2d_{cor}$, конечно, при условии, что антенны не имеют электромагнитного взаимодействия. В противном случае принятые сигналы могут быть коррелированы из-за электромагнитного взаимодействия антенн.

Функциональная зависимость вероятности ошибки приема бита информации в ПРМ ЗсСС при пространственно-разнесенном НК приеме сигналов на две антенны с квадратичным сложением в статистически однородных каналах приема при наличии коррелированных замираний по обобщенному релейскому закону (закону Райса) определяется уравнением помехоустойчивости [9]:

$$P_{\text{ош}}(2) = \frac{2(1+\gamma^2)^2}{h^4(1-R^2)+4h^2(1+\gamma^2)+4(1+\gamma^2)^2} \exp\left[-\frac{2\gamma^2 h^2}{h^2(1+R)+2(1+\gamma^2)}\right] +$$

$$+ \frac{h^2[h^2(1-R^2)+2(1+\gamma^2)](1+\gamma^2)^2}{[h^4(1-R^2)+4h^2(1+\gamma^2)+4(1+\gamma^2)^2]^2} \times$$

$$\times \exp\left\{-\frac{2\gamma^2}{1+R} + \frac{2\gamma^2(1+\gamma^2)}{[h^2(1-R^2)+2(1+\gamma^2)](1+R)^2} + \right. \quad (8)$$

$$\left. + \frac{2\gamma^2(1+\gamma^2)(1-R^2)[h^2(1+R)+2(1+\gamma^2)]^2}{[h^2(1-R^2)+2(1+\gamma^2)][h^4(1-R^2)+4h^2(1+\gamma^2)+4(1+\gamma^2)^2](1+R)^2}\right\} \times$$

$$\times \left\{1 + \frac{2\gamma^2(1+\gamma^2)(1-R^2)[h^2(1+R)+2(1+\gamma^2)]^2}{[h^2(1-R^2)+2(1+\gamma^2)][h^4(1-R^2)+4h^2(1+\gamma^2)+4(1+\gamma^2)^2](1+R)^2}\right\},$$

где h^2 – значение среднестатистического энергетического ОСШ в ветвях пространственного разнесения антенн; γ^2 – параметр Райса, вычисляемый по формуле (4).

Требуется:

1. Определить, расстояние d , на которое следует разнести приемные антенны, чтобы принятые ими сигналы были некоррелированными при условии, что ПНЧ f_0 принимает значения 30 и 100 МГц.

2. По результатам выполнения пункта 1 определить и построить графики КЭС ССС при изменении значения несущей частоты f_0 от 30 до 100 МГц, для случаев, когда расстояние d между двумя приемными антеннами соответствует требованию отсутствию корреляции принимаемых сигналов на частотах 30 и 100 МГц.

3. По результатам выполнения пунктов 1 и 2 оценить и проанализировать возможность обеспечения энергетической скрытности ССС в диапазоне частот $f_0 = 30 \dots 100$ МГц при пространственно-разнесенном НК приеме сигналов на две антенны ($n = 2$) и наличии коррелированных замираний принимаемых сигналов по обобщенному релеевскому закону (закону Райса).

2. Результаты вычислительного эксперимента и их анализ

2.1. Определение расстояния, на которое следует разнести приемные антенны, чтобы принятые ими сигналы были некоррелированными

Результаты вычислений коэффициента пространственной корреляции сигналов, принятых антеннами, разнесенными на расстояние $d \in 0 \dots 1600$ м, для несущих частот 30 и 100 МГц, выполненные в MATLAB по формулам (6) и (7), показаны на рисунке 2. Для определения расстояния d , на которое следует разнести приемные антенны, чтобы принятые ими сигналы были некоррелированными, на рисунке 2 проведена пунктирная линия постоянного уровня $R = 0,36788$, соответствующая убыванию коэффициента пространственной корреляции принимаемых сигналов в e раз, где e – основание натурального алгоритма ($e = 2,71828182$).

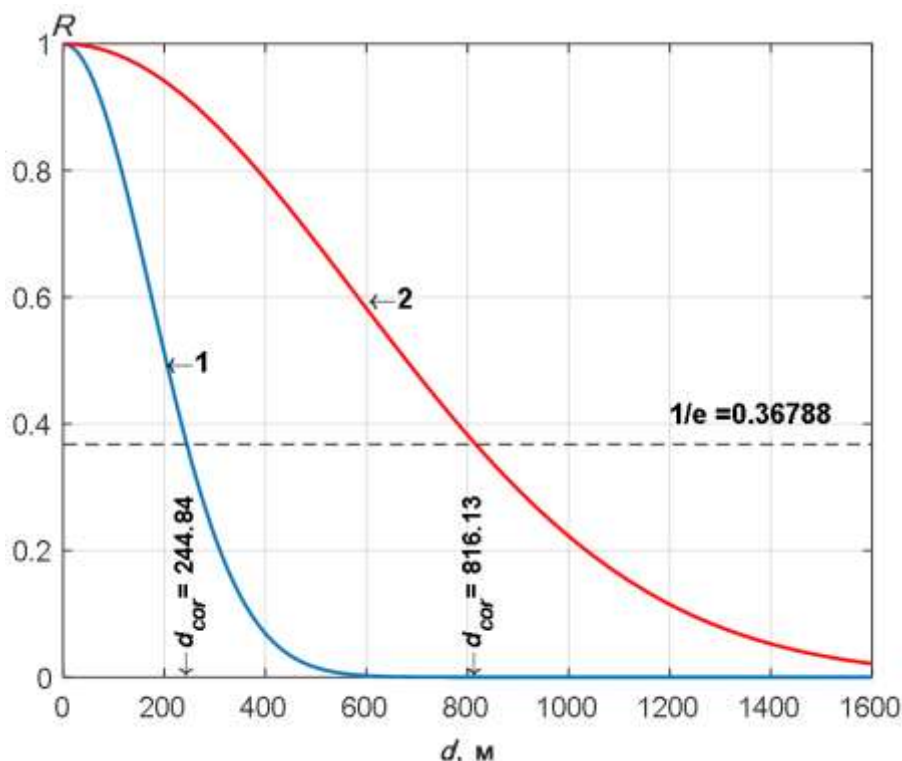


Рисунок 2 – Графики коэффициента пространственной корреляции сигналов при пространственно-разнесенного приема на две антенны, в зависимости от расстояния между ними, для несущих частот: 1) $f_0 = 30$ МГц; 2) $f_0 = 100$ МГц

Проекция точек пересечения линии постоянного уровня $R = 0,36788$ с графиками изменения коэффициента пространственной корреляции сигналов для несущих частот 30 и 100 МГц на ось абсцисс позволяют определить радиус корреляции принимаемых сигналов:

$$d_{cor} = \begin{cases} 244,84 \text{ м, если } f_0 = 30 \text{ МГц;} \\ 816,13 \text{ м, если } f_0 = 100 \text{ МГц.} \end{cases} \quad (9)$$

С учетом неравенства $d \geq 2d_{cor}$ и найденных радиусов корреляции принимаемых сигналов (9), выберем расстояние их пространственного разнеса $d = 800, 1200$ и 1600 м.

Вычисленные и построенные в MATLAB графики зависимости КЭС ССС $\gamma_{эс}(f_0)$, показаны на рисунке 3.

Примечание – В процессе вычислительного эксперимента в MATLAB нахождение параметров $h_{рз}^2$ и $h_{тр2}^2$, необходимых для определения КЭС ($\gamma_{эс}$) по формуле (1), было

реализовано с использованием численных методов уточнения корней нелинейных уравнений обнаружения (3) и помехоустойчивости (8), рассмотренных в статье [5].

На рисунке 3 видно, что при пространственно-разнесенном приеме на две приемные антенны и наличии коррелированных замираний по обобщенному релейевскому закону (закону Райса) условие (2) обеспечения энергетической скрытности ССС выполняется во всем диапазоне ПНЧ $f_0 \in 30 \dots 100$ МГц, если расстояние d между антеннами составляет 1200 и 1600 м.

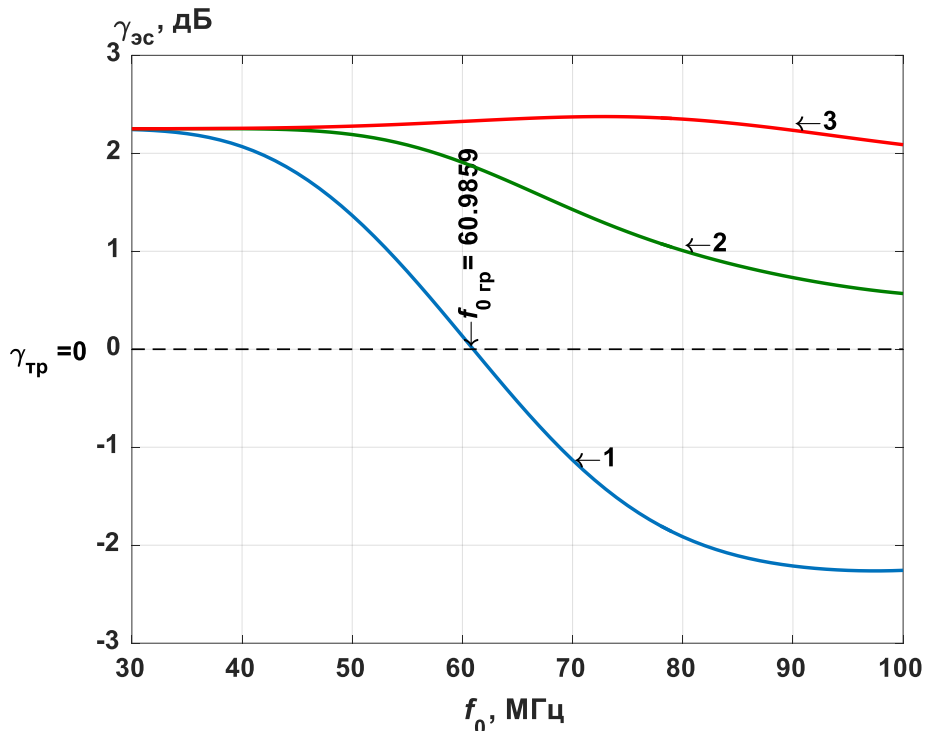


Рисунок 3 – Графики зависимости коэффициента энергетической скрытности спутниковой системы связи с пониженной несущей частотой для случаев пространственно-разнесенного приема сигналов на две антенны, когда расстояние между ними принимает значения: 1) $d = 800$ м; 2) $d = 1200$ м; 3) $d = 1600$ м

Если же расстояние между антеннами $d = 800$ м, то условие (2) обеспечения энергетической скрытности ССС выполняется только в ограниченном интервале частот от 30 МГц и до граничной частоты $f_{0 \text{ гр}} = 60,9859$ МГц, выше которой энергетическая скрытность ССС уже не обеспечивается. При этом для частот выше граничной частоты $f_{0 \text{ гр}} = 60,9859$ МГц происходит заметное уменьшение КЭС до уровня менее -2 дБ, достигаемого на частоте 100 МГц.

Кроме того, на рисунке 3 видно, что если расстояние d между приемными антеннами составляет 1200 и 1600 м, то, по мере увеличения значения несущей частоты от 30 до 100 МГц, КЭС ССС только увеличивается, достигая при этом на частоте 100 МГц уровня более 2 дБ.

Для того чтобы проанализировать причины такого изменения КЭС ССС, на рисунке 4 показаны графики, иллюстрирующие изменение параметров h_{p3}^2 и h_{tp2}^2 , необходимых для определения КЭС ($\gamma_{эс}$) по формуле (1), когда расстояние d между приемными антеннами составляет 800, 1200 и 1600 м.

Из анализа графиков на рисунке 4 можно сделать следующие выводы:

– графики параметров h_{p3}^2 и h_{tp2}^2 при изменении частоты от 30 до 100 МГц, при пространственном разnose приемных антенн $d = 800$ м, пересекаются на частоте $f_{0 гр} = 60,9859$ МГц. Причем, левее этой частоты график параметра h_{p3}^2 находится выше графика параметра h_{tp2}^2 , а правее нее, наоборот, график параметра h_{p3}^2 находится ниже графика параметра h_{tp2}^2 . Поэтому на частотах менее $f_{0 гр} = 60,9859$ МГц КЭС больше нуля и, в соответствии с критерием (2), энергетическая скрытность ССС в этом случае обеспечивается. На частоте $f_{0 гр} = 60,9859$ МГц и более значение КЭС ССС не превышает ноль в логарифмических единицах измерения. Поэтому в соответствии с критерием (2), энергетическая скрытность ССС на частотах выше $f_{0 гр} = 60,9859$ МГц уже не обеспечивается;

– при изменении значения несущей частоты от 30 до 100 МГц графики параметров h_{p3}^2 и h_{tp2}^2 при пространственном разnose приемных антенн на расстояние 1200 и 1600 м не пересекаются. Причем в этих случаях график параметра h_{p3}^2 находится заметно выше графиков параметра h_{tp2}^2 . Поэтому при пространственном разnose приемных антенн на расстояние не менее 1200 м энергетическая скрытность ССС, в соответствии с критерием (2), обеспечивается уже во всем диапазоне пониженных несущих частот, т. е. $f_0 \in 30 \dots 100$ МГц.

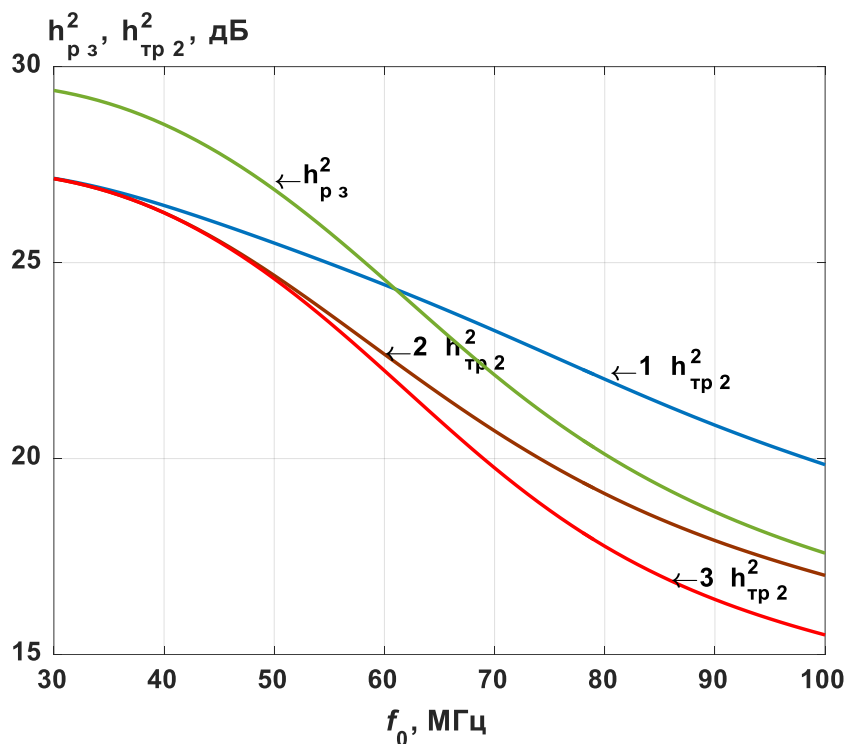


Рисунок 4 – Графики зависимости от частоты параметров h_{p3}^2 и h_{tr2}^2 для случаев пространственно-разнесенного приема сигналов на две антенны, когда расстояние между ними принимает значения: 1) $d = 800$ м; 2) $d = 1200$ м; 3) $d = 1600$ м

Выводы

Таким образом, анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Оценка энергетической скрытности ССС показала, что при использовании в ССС пониженных несущих частот $f_0 = 30 \dots 100$ МГц даже при близком размещении ПРМ радиобнаружения средства РРТР к ПРМ ЗсСС и наличии коррелированных замираний по обобщенному релейскому закону (закону Райса), можно обеспечить, наряду с требуемой помехоустойчивостью, достижение требуемой энергетической скрытности ССС на уровне не менее 2 дБ во всем диапазоне пониженных несущих частот, т. е. $f_0 \in 30 \dots 100$ МГц, при пространственно-разнесенном приеме на две антенны, если расстояние между ними составляет не менее 1200 м.

2. Если расстояние между двумя приемными антеннами ЗсСС составляет менее 1200 м, то в этом случае для обеспечения энергетической скрытности ССС на уровне не хуже требуемого ($\gamma_{эс тр} \geq 0$ дБ), возникает проблема выбора несущей частоты из

определенного поддиапазона частот ($f_0 \in 30...60,9859$ МГц для разнесения антенн на 800 м), которая не имеет однозначного решения.

References

1. Тузов Г. И, Сивов В. А., Прытков В. И., Урядников Ю. Ф., Дергачев Ю. А., Сулиманов А. А. Помехозащищенность систем со сложными сигналами. – М.: Сов. радио, 1985. – 264 с.
2. Чипига А. Ф. Анализ энергетической скрытности низкочастотных систем спутниковой связи от обнаружения сигналов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 2. – С. 209-216.
3. Чипига А. Ф., Сенокосова А. В. Защита информации в системах космической связи за счет изменения условий распространения радиоволн // Космические исследования. 2007. Т. 45. № 1. – С. 59-66.
4. Кириллов Н. Е. Помехоустойчивая передача сообщений по линейным каналам со случайно изменяющимися параметрами. М.: Связь. 1971. – 256 с.
5. Ляхов, А. В. Определение зависимости коэффициента энергетической скрытности систем спутниковой связи при обнаружении сигналов от выбора рабочей частоты на основе численных методов решения нелинейных уравнений/ А.В. Ляхов // Современная наука и инновации, № 1 (17), 2017, с. 42-49.
6. Ляхов, А. В. Методика оценки вероятности правильного обнаружения сигналов с райсовскими замираниями / А. В. Ляхов, В. П. Пашинцев, А. Д. Белов и др. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, №3 (7) 2012, 2012, с. 21-26.
7. Пашинцев В. П., Солчатов М. Э., Гахов Р. П. Влияние ионосферы на характеристики космических систем передачи информации (монография) / В.П. Пашинцев, М. Э. Солчатов, Р. П. Гахов. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2006. – 191 с.
8. Буга Н. Н. Основы теории связи и передачи данных. Часть 2. – Л.: ЛВКИА, 1970. – 707 с.
9. Андронов И. С., Финк Л. М. Передача дискретных сообщений по параллельным каналам. – М.: Сов. радио, 1971. – 408 с.