УДК 621.396.946

Повышение энергетической скрытности узкополосных сигналов систем спутниковой связи при трансионосферном распространении радиоволн через неоднородную ионосферу за счет понижения несущих частот и пространственно-разнесенного приема

Часть 2. Вычислительный эксперимент по оценке границ повышения энергетической скрытности и анализ его результатов

Ляхов А.В.

Актуальность статьи обусловлена тем, что решение задачи проектирования перспективных спутниковых систем связи (ССС) должно базироваться на комплексном подходе, который предполагает учет всех параметров и ограничений, обеспечивающих как требования по эффективности ее функционирования, включая требования, как по помехоустойчивости, так и по ее скрытности от средств радио- и радиотехнической разведки (РРТР).. Однако при этом известная методика определения коэффициента энергетической скрытности (КЭС) ССС является графоаналитической. Поэтому она не позволяет автоматизировать процесс определения КЭС с помощью современных средств вычислительной техники, что затрудняет решение задачи проектирования перспективных ССС. В первой части статьи были рассмотрены и адаптированы численные методы половинного деления, хорд, Ньютона и метода Ньютона-хорд, применяемые традиционно для уточнения корня нелинейного уравнения с одним неизвестным, для определения значений энергетического отношения сигнал-шум (ОСШ) на входе приемника земной станции спутниковой связи и на входе приемника радиообнаружения средства РРТР. Таким образом, реализованы необходимые предпосылки для реализации методики автоматизированной оценки КЭС ССС, позволяющей еще на этапе проведения предконтрактных работ определить потенииальную энергетическую скрытность проектируемой ССС с учетом возможностей стороны, осуществляющей РРТР. Целью работы является анализ результатов вычислительного эксперимента по оценке границ повышения энергетической скрытности узкополосных сигналов систем спутниковой связи с пониженными несущими частотами. Результаты и их новизна. Впервые получены и проанализированы результаты вычислительного эксперимента по оценке границ повышения энергетической скрытности узкополосных сигналов систем спутниковой связи с пониженными несущими частотами при изменении количества и пространственного разноса элементов приемной антенной системы, параметров неоднородной ионосферы и угла трансионосферного распространения радиоволн. Практическая значимость заключается в том, что результаты проведенного вычислительного эксперимента будут полезны техническим специалистам для обоснования исходных данных, необходимых для проведения расчетов по уточнению параметров перспективных ССС с учетом одновременного обеспечения ими требований, как по требуемой помехоустойчивости, так и по скрытности связи. Кроме того, эти результаты могут представлять интерес для научных работников и соискателей, ведущих научные исследования в области спутниковой связи.

Библиографическая ссылка на статью:

Ляхов А. В. Повышение энергетической скрытности узкополосных сигналов систем спутниковой связи при трансионосферном распространении радиоволн через неоднородную ионосферу за счет понижения несущих частот и пространственно-разнесенного приема. Часть 2. Вычислительный эксперимент по оценке границ повышения энергетической скрытности и анализ его результатов // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 4. С. 313-367. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-313-367

Reference for citation:

Lyakhov A. V. Increasing the energy secrecy of narrow-band signals of satellite communication systems during transionospheric propagation of radio waves through an inhomogeneous ionosphere due to a decrease in carrier frequencies and space-diversified reception. Part 2. Computational experiment to estimate the boundaries of increasing energy secrecy and analysis of its results. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 4, pp. 313-367 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-313-367

Ключевые слова: низкочастотная система спутниковой связи, райсовские замирания, трансионосферное распространение радиоволн, численный метод, коэффициент энергетической скрытности, методика автоматизированной оценки коэффициента энергетической скрытности, спутниковая система связи.

Введение

Известна [1–3] проблема повышения энергетической скрытности ССС, функционирующей в условиях РРТР, которая существенно усложняется при близком размещении приемника (ПРМ) радиообнаружения от ПРМ земной станции спутниковой связи (ЗсСС).

Для разрешения этой проблемы разработан способ обеспечения энергетической скрытности ССС при близком размещении ПРМ радиообнаружения от ПРМ ЗсСС (на удалении не более 10 км) [2]. Этот способ учитывает известные [3] особенности распространения радиоволн (РРВ) диапазона частот от 30 до 100 МГц в ионосфере, заключающиеся в том, что в нормальной ионосфере электронная концентрация (ЭК) $N_i = \overline{N} + \Delta N_i$ содержит флуктуации ΔN_i относительно среднего (фонового) значения \overline{N} (рис. 1).

Вследствие этого, при трансионосферном РРВ с пониженными несущими частотами (ПНЧ) до $f_0 = 30...100$ МГц через неоднородную ионосферу к ПРМ ЗсСС приходит множество (i = 1...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 райсовского ($0 < \Delta \varphi_i \le 2\pi$) или рэлеевского ($\Delta \varphi_i >> 2\pi$) типа, причем райсовские замирания могут быть произвольной глубины.

Примечание – Для упрощения работы с материалом статьи полный перечень используемых в ней обозначений сведены в таблицу 1.

Обозначение	Физический смысл обозначения
<i>Р</i> _{по з}	– заданная вероятность правильного обнаружения сигнала
	разведываемой системы связи
$P_{\rm JTT 3}$	–заданная вероятность ложной тревоги при обнаружении
	сигнала разведываемой системы связи
h_{r}^{2}	– энергетическое ОСШ на входе ПРМ радиообнаружения
лър	средства РРТР
$h_{\pi\pi}^2$	– энергетическое ОСШ на входе ПРМ радиообнаружения,
<i>w</i> p 3	необходимое для достижения заданной вероятности правиль-
	ного обнаружения $P_{\Pi 0,3}$ (например, $P_{\Pi 0,3} = 0,99$) сигнала
	ССС при заданной вероятности ложной тревоги $P_{\text{лт 3}}$
	(например, $P_{\rm лт3} = 10^{-4}$)
R _p	– удаление ПРМ радиообнаружения средства РРТР от ПРМ
1	3cCC

Таблица 1 – Обозначения

Обозначение	Физический смысл обозначения
P	- требуемая вероятность ошибки <i>Р</i> приема бита инфор-
1 ош тр	пребуемая вероятноств ошноки гоштр приема онта инфор-
	мации
$h_{\rm Tp}^2$	– ОСШ на входе ПРМ ЗсСС, определяемое из условия обес-
L. L.	печения требуемого качества связи (помехоустойчивости),
	оцениваемого таким показателем, как требуемая вероятность
	ошибки $P_{\text{ош тр}}$ приема бита информации (например,
	$P_{\rm OIII} = P_{\rm OIII \ Tp} = 10^{-5}$)
$h_{\text{Tp} n}^2$	– ОСШ на входе ПРМ ЗсСС, определяемое из условия обес-
*	печения требуемого качества связи (помехоустойчивости),
	при пространственно разнесенном приеме на <i>n</i> антенн
γ _{эс}	– коэффициент энергетической скрытности разведываемой
	системы связи
<i>ү</i> эс тр	– требуемое значение коэффициента энергетической скрыт-
_	ности разведываемой системы связи
$(\gamma_{3c})_{max max}$	– Ммаксиморум (maximum maximorum) коэффициента
	энергетической скрытности разведываемой системы связи
В	 – база сигнала разведываемой системы связи
N_i	– электронная концентрация в <i>i</i> -той неоднородности нор-
	мальной ионосферы
\overline{N}	-среднее (фоновое) значение электронной концентрации в
	нормальной ионосфере
ΔN_i	– флуктуации электронной концентрации относительно сред-
	него (фонового) значения N в <i>i</i> -той неоднородности нор-
	мальной ионосферы
$\Delta \phi_i$	– относительный фазовый сдвига луча, приходящего в точку
	приема, рассеянного <i>i</i> -той неоднородностью электронной
	концентрации нормальной ионосферы (ΔN_i)
f_0	– несущая частота сигнала разведываемой системы связи
$f_{0 \ { m rp}}$	– граничная пониженная несущая частота, на которой коэф-
	фициент энергетической скрытности ССС достигает требуе-
	мого значения у эс тр
Pn	– мощности регулярной (не случайной) составляющей при-
þ	нимаемого сигнала
Рфл	– мощности флуктуационной (случайной) составляющей
<u></u> Ψл	принимаемого сигнала
γ^2	– параметра Райса принимаемого сигнала, который определя-
Y	ется как отношение мощностей его регулярной и флуктуаци-
	онной составляющей
$\left(\chi^2 \right)$	– минимальное значение параметра Райса принимаемого сиг-
$(\gamma)_{min}$	нала

Обозначение	Физический смысл обозначения
R	– коэффициент пространственной корреляции быстрых зами-
	раний в элементах приемной антенной системы
ΔR	– диапазон изменения коэффициента пространственной кор-
	реляции быстрых замираний в элементах приемной антенной
	системы
α	– угол α трансионосферного распространения радиоволн от-
	носительно вертикали (зенитный угол)
$Q(g_1, h_{01})$	$-$ функция Маркума от аргументов g_1 и h_{01} , которые должны
	быть неотрицательными вещественными числами (g_1 , $h_{01} \ge 0$)
$I_0(g_1x)$	– модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого
	порядка
σ	– среднеквадратическое отклонение относительного фазового
Ϋ́	сдвига лучей, приходящих в точку приема
(σ.,)	– максимальное значение среднеквадратическое отклонение
$({}^{\circ}\phi)_{max}$	фазового фронта принимаемой волны
С	– скорость света
l_s	– характерный размер ионосферных неоднородностей
h _m	 высота максимума ионизации в слое F ионосферы
\overline{N}_m	– максимальная средняя электронная концентрация в слое F
	ионосферы на высоте максимума ионизации
$h_{\mathfrak{H}}$	– эквивалентная толщина ионосферы со средней электронной
	концентрацией, равной ее максимальному значению
$\sigma_{\Delta N}$	– среднеквадратическое отклонение флуктуаций электронной
	концентрации в неоднородностях ионосферы
β _и	– интенсивность ионосферных неоднородностей, которая опре-
	деляется как отношение среднеквадратическое отклонение
	флуктуаций электронной концентрации в неоднородностях
	ионосферы к максимальной средней электронной концентра-
	ции в слое F ионосферы на высоте максимума ионизации
$\vec{\lambda}$	– вектор параметров ионосферы с элементами $h_{\mathfrak{I}}, \sigma_{\Delta N}, l_s$ или
	$h_{\mathfrak{H}}, \overline{N}_m, \beta_{\mathfrak{H}}, l_s$ в зависимости от контекста
n	– количество элементов приемной антенной системы
Δρ	– расстояние между элементами приемной антенной системы
	в случае их линейного эквидистантного разнесения
$\Delta \rho_{K}$	– интервал пространственной корреляции быстрых замира-
	ний принимаемых сигналов
Рош	 вероятности ошибки приема бита информации
λ_k, λ_p	– собственные значений корреляционной матрицы быстрых
	замираний в элементах приемной антенной системы
	(k, p = 1, 2,, n)
λ	– вектор собственных значений корреляционной матрицы
	быстрых замираний в элементах приемной антенной системы

Обозначение	Физический смысл обозначения
Ι	– единичная диагональная матрица
\overline{h}^{2}	– среднее значение ОСШ в ветвях пространственного разне-
	сения приемных антенн



Рис. 1. Модель размещения передатчика и приемника ЗсСС с ПНЧ при близком размещении приемника радиообнаружения средства РРТР и пространственно-разнесенном приеме на четыре антенны

При традиционно используемых в ССС несущих частотах $f_0 = 1...10$ ГГц относительные фазовые сдвиги лучей отсутствуют (т. к. $\Delta \varphi_i \sim \Delta N_i / f_0 = 0$), и поэтому интерференционные быстрые замирания сигналов не возникают.

Глубину райсовских замираний 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) $P_{\phi \pi}$ составляющей $\gamma^2 = P_p / P_{\phi \pi}$ [2]. Таким образом, параметр Райса может принимать произвольные значения от

нуля ($\gamma^2 = 0$) при рэлеевских замираниях, когда мощность регулярной составляющей принимаемого сигнала равна нулю ($P_p = 0$) и вплоть до бесконечности ($\gamma^2 = \infty$) при отсутствии замираний, когда мощность флуктуационной (случайной) составляющей принимаемого сигнала равна нулю ($P_{\phi\pi} = 0$), т. е. $0 \le \gamma^2 \le \infty$.

Для того чтобы скомпенсировать отрицательные эффекты, возникающие при приеме сигналов с быстрыми замираниями в ЗсСС, в рамках известного способа повышения энергетической скрытности ССС [2], предлагается использовать пространственно-разнесённый приём сигналов на четыре антенны. В то время как в ПРМ радиообнаружения скомпенсировать отрицательные эффекты, возникающие при приеме сигналов с замираниями, невозможно, т. к. этот приемник, в связи с ограничениями на массогабаритные характеристики средства РРТР, вынужден использовать традиционные методы одиночного приема сигнала (т. е. на одну антенну).

В рамках известного способа повышения энергетической скрытности ССС [2] КЭС ССС с пониженными несущими частотами (ПНЧ) до $f_0 = 30...100$ МГц рассчитывался по формуле:

$$\gamma_{3c} = h_{p3}^2 / h_{Tp}^2$$
 или $(\gamma_{3c})_{db} = (h_{p3}^2)_{db} - (h_{Tp}^2)_{db}$, (1)

где: $h_{p\,3}^2$ – значение энергетического ОСШ на входе ПРМ радиообнаружения средства РРТР, необходимого для достижения заданного качества обнаружения, т. е. обеспечения заданной вероятности правильного обнаружения $P_{\pi\sigma 3}$ сигнала ССС при заданной допустимой вероятности ложной тревоги $P_{\pi\tau 3}$; h_{Tp}^2 – значение энергетического ОСШ на входе ПРМ ЗсСС, определяемое из условия обеспечения требуемого качества связи (помехоустойчивости), оцениваемого таким показателем, как требуемая вероятность ошибки $P_{\text{ош тр}}$ приема бита информации.

При этом, в [2] сделан вывод о том, что, если в ССС используются ПНЧ (до $f_0 = 30...100$ МГц), обуславливающие рэлеевские замирания принимаемых сигналов, и пространственно-разнесенный прием на четыре антенны, то можно обеспечить достижение высокой энергетической скрытности ССС на уровне КЭС, равного 14 дБ. Причем такой эффект достигается при близком размещении ПРМ радиообнаружения к ПРМ ЗсСС и при передаче в радиолинии «ИСЗ-ЗсСС» простых сигналов.

Недостатками указанной методики определения КЭС ССС с ПНЧ, использованной в [2], являются:

игнорирование возможности возникновения в канале радиообнаружения райсовских замираний принимаемых сигналов произвольной глубины вследствие эффектов, сопровождающих трансионосферное PPB в диапазоне ПНЧ f₀ = 30...100 МГц;

- игнорирование наличия пространственной корреляции быстрых замираний сигналов в элементах приемной АС [4];
- использование графических методов определения параметров h_{rp}^2 и

 $h_{\rm p\,3}^2$, что приводит к значительным затратам времени и методическим погрешностям вычисления КЭС по формуле (1), т. к. исходные данные для таких вычислений определяются достаточно грубо, «на глаз».

С целью преодоления перечисленных недостатков в первой части статьи [1] рассмотрен ряд следующих принципиальных и актуальных с практической точки зрения вопросов оценки КЭС ССС с ПНЧ:

1) решена задача определения с высокой точностью, когда относительная процентная погрешность не превышает 10^{-4} %, значения энергетического отношения сигнал-шум (ОСШ), необходимого для обнаружения сигнала ССС ПРМ радиообнаружения средства РРТР с заданным качеством ($P_{\rm по 3} = 0,99$ и $P_{\rm лт 3} = 10^{-4}$) и значения энергетического ОСШ (далее для краткости ОСШ), гарантирующего пространственно-разнесенный прием сигналов на несколько антенн ССС с требуемой вероятностью ошибки приема бита информации ($P_{\rm ош \ Tp} = 10^{-5}$) на основе численных методов поиска корня нелинейных уравнений обнаружения и помехоустойчивости с одним неизвестным и их реализации в МАТLAB в виде семи программных модулей: метод половинного деления, метод хорд, метод Ньютона и методом Ньютона-хорд (для уравнения обнаружения) и методами половинного деления и метода хорд (для уравнения помехоустойчивости);

2) доказано, что оценка КЭС ССС на основе применения численных методов уточнения корней нелинейных уравнений обнаружения и помехоустойчивости позволяет, как минимум, на три порядка уменьшить относительную процентную погрешность определения этого параметра по сравнению с известными графоаналитическим методами;

3) оценка КЭС ССС была выполнена с учетом того, что в канале радиообнаружения могут возникать райсовские замирания принимаемых сигналов произвольной глубины;

4) оценка КЭС ССС была выполнена с учетом наличия пространственной корреляции быстрых замираний сигналов в пространственно-разнесенных антеннах, используемых для приема в ЗсСС, а также зависимость коэффициента пространственной корреляции этих замираний R от значения несущей частоты f_0 , параметров ионосферы, угла трансионосферного распространения радиоволн и расстояния между антеннами, на которое они разнесены в пространстве;

5) для исходных данных, соответствующих формулировке общей задачи исследования, приведенной в первой части статьи [1], было показано, что энергетическая скрытность рассматриваемой ССС обеспечивается в интервале частот от 30 и примерно до 78 МГц, т. к. в этом случае КЭС (γ_{3c})_{лБ} > 0, а начиная с частоты 78 МГц и выше, энергетическая скрытность ССС уже не обеспечивается, т. к. на этих частотах $(\gamma_{3c})_{\pi E} \leq 0$.

Таким образом, значение несущей частоты, равное 78 МГц, может рассматриваться, как значение граничной частоты $f_{0 rp}$, выше которой требуемая энергетическая скрытность анализируемой ССС не обеспечивается, если требуемое значение КЭС $\gamma_{3c rp}$ равно единице в абсолютных величинах ($\gamma_{3c rp} = 1$) или равно нулю в логарифмических единицах измерения ($\gamma_{3c rp}$)_{дБ} = $=10\log(1)=0$ дБ.

В первой части статьи [1] также отмечалось, что с практической точки зрения, необходимо, чтобы КЭС системы связи был не просто больше единицы, а был бы не менее некоторого требуемого значения $\gamma_{3c Tp}$. Например, если $\gamma_{3c Tp} = 20$, то тогда должны выполняться неравенства $\gamma_{3c} \ge \gamma_{3c Tp} = 20$ или $(\gamma_{3c})_{db} \ge (\gamma_{3c Tp})_{db} = 13 \text{ дБ}.$

С учетом этого, введем в рассмотрение и определим понятие граничная несущая частота следующим образом: граничная несущая частота $f_{0 rp}$ – это частота, на которой коэффициент энергетической скрытности ССС достигает требуемого значения $\gamma_{3c rp}$.

После того, как термин граничная несущая частота $f_{0 \text{ гр}}$ определен, можно утверждать, что рабочий диапазон частот, в пределах которого обеспечивается энергетическая скрытность анализируемой ССС на уровне не хуже $(\gamma_{\text{эс тр}})_{\pi \text{Б}} = 0$ дБ, простирается от 30 МГц и до $f_{0 \text{ гр}} \cong 78$ МГц.

Далее во второй части статьи будут рассмотрена методика автоматизированной оценки КЭС ССС, базирующаяся на применении численных методов уточнения корней нелинейных уравнений обнаружения и помехоустойчивости, и её реализации в независимом приложении МАТLAB. Также будут проанализированы результаты вычислительного эксперимента по исследованию зависимости КЭС ССС и значения граничной частоты $f_{0 rp}$, а также др. параметров, связанных с энергетической скрытностью ССС, при изменении значения несущей частоты f_0 в интервале от 30 до 100 МГц.

Актуальность

При проектировании любой ССС, включая и ССС с ПНЧ одной из основных задач является определение параметров приемной и передающей системы соответствующих линий связи. Здесь, как уже отмечалось в первой части статьи [1], термин «ССС с ПНЧ» указывает на то, что ССС работает в диапазоне ниже минимального значения $f_0 = 150...200$ МГц диапазонов частот, отведенных Регламентом радиосвязи МККР для ССС.

Как известно, при использовании в ССС традиционных несущих частот $f_0 = 1...10$ ГГц, определению подлежат следующие параметры системы связи [5-9]:

- скорость передачи информационного сигнала;
- вид первичной модуляции;
- несущая частота связного сигнала;
- коэффициент усиления передающей антенной системы (AC);
- эквивалентная изотропная излучаемая мощность;
- коэффициент усиления приемной АС;
- шумовая температура приемной системы;
- база сигнала.

Как правило, перечисленные параметры системы связи, за исключением последнего, предварительно определяются Заказчиком и выдаются в виде исходных данных [6].

Однако при их определении не учитываются требования по обеспечению энергетической скрытности связи, т. е. возможности «третьей стороны» по обнаружению сигналов источника излучения [5]. В связи с этим в статье [6] сделан акцент на том, что при определении исходных данных для расчета линий спутниковой связи (СпС) следует исходить из того, что параметры приемной и передающей системы полностью согласованы и находятся в частотной и временной синхронизации.

При определении исходных данных для расчета эффективности функционирования для получения гарантированных оценок по скрытности линий СпС, необходимо полагать, что «третья сторона», осуществляющая радиоразведку (радиомониторинг), выберет наиболее рациональные в соответствующей ситуации параметры разведывательной аппаратуры (радиомониторинга (PM)).

Очевидно, что проведение таких расчетов должно базироваться на комплексном подходе, который предполагает учет всех параметров и ограничений, обеспечивающих как требования по эффективности функционирования системы СпС, так и по ее скрытности от средств РМ. В основе этих расчетов положены описательные модели функционирования всех элементов системы [6].

Очевидно, что с учетом рекомендаций, высказанных в [6], решение актуальной задачи проектирования перспективных ССС с ПНЧ должно также базироваться на комплексном подходе, который предполагает учет всех параметров и ограничений, обеспечивающих как требования по эффективности ее функционирования, включая требования, как по помехоустойчивости, так и по ее скрытности от средств РРТР.

При этом следует учитывать, что задача проектирования таких ССС имеет ряд особенностей, т. к. в дополнение к перечисленным ранее параметрам определению подлежат количество и пространственный разнос элементов приемной AC.

Алгоритм, реализующий возможный автоматизированный подход к расчету параметров перспективной ССС с ПНЧ, при условии одновременного

обеспечения её помехоустойчивости и энергетической скрытности от обнаружения сигналов средством РРТР, представлен на рис. 2.

Реализация этого алгоритма (рис. 2) невозможна без наличия методики автоматизированного определения КЭС ССС с ПНЧ, которая до сих пор отсутствует, по причине того, что традиционно этот коэффициент определяется графоаналитическими методами [2].



Рис. 2. Алгоритм автоматизированного расчета параметров ССС с ПНЧ с учетом одновременного обеспечения требований к помехоустойчивости связи и энергетической скрытности от обнаружения сигналов *Целью работы* является анализ результатов вычислительного эксперимента по оценке границ повышения энергетической скрытности узкополосных сигналов систем спутниковой связи с пониженными несущими частотами.

Полученные результаты и их новизна. Впервые получены и проанализированы результаты вычислительного эксперимента по оценке границ повышения энергетической скрытности узкополосных сигналов систем спутниковой связи с пониженными несущими частотами при изменении количества и пространственного разноса элементов приемной антенной системы, параметров неоднородной ионосферы и угла трансионосферного распространения радиоволн.

Практическая значимость заключается в том, что результаты вычислительного эксперимента по оценке границ повышения скрытности узкополосных сигналов ССС при трансионосферном распространении радиоволн через неоднородную ионосферу за счет понижения несущих частот и пространственноразнесенного приема будут полезны техническим специалистам для обоснования исходных данных, необходимых для проведения расчетов по уточнению параметров перспективных ССС с учетом одновременного обеспечения ими требований, как по требуемой помехоустойчивости, так и по скрытности связи. Кроме того, эти результаты могут представлять интерес для научных работников и соискателей, ведущих научные исследования в области спутниковой связи.

Авторский материал второй части статьи, ввиду своей объемности, был декомпозирован на ряд логических подразделов.

- 1. Постановка задачи проведения вычислительного эксперимента по оценке границ повышения энергетической скрытности узкополосных сигналов систем спутниковой связи с пониженными несущими частотами.
- 2. Методика автоматизированного определения коэффициента энергетической скрытности систем спутниковой связи в приложении MATLAB CoefficientOfEnergySecrecySatComSystem.
- 3. Результаты вычислительного эксперимента и их анализ.
 - 3.1. Зависимость коэффициента энергетической скрытности и значения граничной частоты в случае пространственно-разнесенном приеме на четыре антенны.
 - 3.2. Зависимость коэффициента энергетической скрытности и значения граничной частоты от количества элементов приемной антенной системы.
 - 3.3. Зависимость коэффициента энергетической скрытности и значения граничной частоты от пространственного разноса элементов приемной антенной системы.
 - 3.4. Зависимость коэффициента энергетической скрытности и значения граничной частоты от изменения среднеквадратического отклонения флуктуаций электронной концентрации в неоднородностях ионосферы.

3.5. Зависимость коэффициента энергетической скрытности и значения граничной частоты от угла трансионосферного распространения радиоволн относительно вертикали.

1. Постановка задачи проведения вычислительного эксперимента по оценке границ повышения энергетической скрытности узкополосных сигналов систем спутниковой связи с пониженными несущими частотами

Дано: С ИСЗ излучается узкополосный простой сигнал с базой близкой к единице ($B \cong 1$) на несущей частоте, принадлежащей диапазону ПНЧ $f_0 \in 30...100$ МГц.

Угол а (рис. 1) трансионосферного РРВ относительно вертикали (зенитный угол) может изменяться в пределах от 0 до 1,4835298642 рад или от 0 до 85° .

ПРМ радиообнаружения средства РРТР расположен на одной высоте при малом удалении $R_p \le 10$ км от приемника ЗсСС.

Противоборствующая («третья») сторона обладает полным объемом информации о разведываемом сигнале (известны несущая частота f_0 и ширина спектра ΔF_0 разведываемого сигнала), модели распространения радиоволн применительно к радиолинии «ИСЗ-ЗсСС» и актуальных параметрах ионосферы. Кроме того, предполагается, что средством РРТР поиск сигнала разведываемой ССС с ПНЧ по несущей частоте f_0 и в пространстве (по направлению на ИСЗ) уже осуществлен.

В ПРМ радиообнаружения средства РРТР реализована схема оптимальной некогерентной (НК) обработки сигналов с флуктуирующей начальной фазой. Заданные значения вероятности правильного обнаружения $P_{\text{по}}$ сигнала ССС и ложной тревоги $P_{\text{лт}}$ равны: $P_{\text{по 3}} = 0,99$, $P_{\text{лт 3}} = 10^{-4}$. При этом вероятность правильного обнаружения сигнала ССС определяется уравнением обнаружения [10]:

$$P_{\text{IIO}} = Q \bigg[g_1 \left(h^2, \gamma^2 \right), h_{01} \left(h^2, \gamma^2, P_{\text{JIT}} \right) \bigg], \qquad (2)$$

где: $Q(g_1, h_{01})$ – функция Маркума от аргументов g_1 и h_{01} , которые должны быть неотрицательными вещественными числами $(g_1, h_{01} \ge 0)$; γ^2 – параметр Райса; h^2 – ОСШ на входе ПРМ радиообнаружения средства РРТР.

Функция Маркума определяется формулой:

$$Q(g_1, h_{01}) = \int_{h_{01}}^{\infty} x \exp\left(-\frac{x^2 + g_1^2}{2}\right) I_0(g_1 x) dx,$$
(3)

где $I_0(g_1x)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Аргументы g₁ и h_{01} функции Маркума в (3), при условии, что в ПРМ радиообнаружения используется схема оптимальной НК обработки сигналов, зависят от параметров h^2 , γ^2 , $P_{\rm nr}$ следующим образом:

$$g_1(h^2, \gamma^2) = \sqrt{2h^2\gamma^2(1+\gamma^2+h^2)^{-1}}; \qquad (4)$$

$$h_{01}(h^2, \gamma^2, P_{\rm JTT}) = \sqrt{2\ln(P_{\rm JTT}^{-1})(1+\gamma^2)(1+\gamma^2+h^2)^{-1}}.$$
 (5)

Зависимость между параметром Райса γ^2 и среднеквадратическим отклонением (СКО) фазовых сдвигов ($\Delta \varphi_i \sim \Delta N_i / f_0$) приходящих лучей $\sigma_{\Delta N}$ в радиоканале с трансионосферным распространением радиоволн описывается выражением вида [11]:

$$\gamma^{2} = P_{\rm p} / P_{\rm \phi \pi} = [\exp(\sigma_{\phi}^{2}) - 1]^{-1}.$$
(6)

В (6) параметр σ_{ϕ} , рад, определяется по формуле:

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

где: с = $3 \cdot 10^8$ – скорость света, м/с; $l_s \approx 400$ – характерный размер ионосферных неоднородностей, м; $h_3 \approx 2,5 \cdot 10^5$ – эквивалентная толщина ионосферы, м, со средней ЭК, равной ее максимальному значению $\bar{N}(h_m) = \bar{N}_m = (2...4) \cdot 10^{12}$, 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; α – угол трансионосферного распространения радиоволн относительно вертикали (зенитный угол), рад; f_0 – несущая частота, Гц; $\sigma_{\Delta N}$ – СКО флуктуаций ЭК в неоднородностях ионосферы, эл/м³, вычисляемое по формуле [11]:

$$\sigma_{\Delta N} = \beta_{\rm H} \bar{N}_m = 10^{-3} \times (2...4) \cdot 10^{12} = (2...4) \cdot 10^9;$$
(8)

где $\beta_{\rm H} = \sigma_{\Delta N} / \overline{N}_m = 10^{-3}$ – интенсивность ионосферных неоднородностей [11]. Требуемая вероятность ошибки приема бита информации в ПРМ ЗсСС

составляет $P_{\text{ош тр}} = 10^{-5}$.

В ПРМ ЗсСС используется пространственно-разнесенный НК прием сигналов на несколько ($n \ge 2$) антенн. Для упрощения вычислений предполагается, что используется вариант линейного эквидистантного разнесения элементов приемной AC на расстояние $\Delta \rho = 400$ м, причем количество элементов приемной AC п $\in 2, 3, ..., 10$. Функциональная зависимость вероятности ошибки приема бита информации в ССС при пространственно-разнесенном некогерентном (HK) приеме сигналов на несколько ($n \ge 2$) антенн с квадратичным сложением в условиях релеевских общих замираний сигналов определяется уравнением помехоустойчивости [4]:

$$P_{\text{OIII}} = \sum_{k=1}^{n} \frac{\lambda_k^{2(n-1)}}{\lambda_k + 2} \prod_{\substack{p=1\\p \neq k}}^{n} \frac{\lambda_p + 1}{(\lambda_k - \lambda_p)(\lambda_k + \lambda_p + \lambda_k \lambda_p)},\tag{9}$$

где λ_k , λ_p – собственные значения корреляционной матрицы KQ, определяемые из решения уравнения:

$$\det(KQ - \lambda I) = 0, \tag{10}$$

где *I* – единичная диагональная матрица.

В случае линейного эквидистантного разнесения элементов приемной AC на фиксированное расстояние $\Delta \rho = const$ корреляционная матрица *KQ* является квадратной, размером $n \times n$:

$$KQ = \bar{h}^{2} \begin{pmatrix} 1 & R & R^{4} & \cdots & R^{(n-1)^{2}} \\ R & 1 & R & \cdots & R^{(n-2)^{2}} \\ R^{4} & R & 1 & \cdots & R^{(n-3)^{2}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R^{(n-1)^{2}} & R^{(n-2)^{2}} & R^{(n-3)^{2}} & \cdots & 1 \end{pmatrix},$$
(11)

где: \bar{h}^2 – среднее значение ОСШ в ветвях пространственного разнесения антенн; R – коэффициент пространственной корреляции быстрых замираний в линейно разнесенных на эквидистантный интервал $\Delta \rho$ элементах приемной AC, вычисляемый по формуле [11]:

$$R = \exp\left[-\left(\Delta\rho/\Delta\rho_{\rm K}\right)^{2}\right] = \exp\left[-\left(\Delta\rho\sigma_{\phi}/l_{s}\right)^{2}\right] =$$
$$= \exp\left\{-\left[\Delta\rho\sqrt[4]{\pi}\left(80,8\pi/c\right)\sqrt{l_{s}h_{3}}\left(\sigma_{\Delta N}/f_{0}\right)\sqrt{\sec\alpha}/l_{s}\right]^{2}\right\},\tag{12}$$

где $\Delta \rho_{\kappa} = l_s / \sigma_{\phi}$ – интервал пространственной корреляции быстрых замираний принимаемых сигналов, м.

Требуется:

1. Разработать методику автоматизированного определения КЭС ССС и реализовать её в независимом приложении MATLAB.

2. Определить в приложении МАТLAB, при изменении значения несущей частоты f_0 от 30 до 100 МГц с шагом 1 МГц, КЭС ССС, вычисляемый по формуле

$$\gamma_{\rm 3c} \Big(f_0, P_{\rm OIII \, Tp}, P_{\rm IIO \, 3}, P_{\rm JIT \, 3}, n, R, \alpha, \vec{\lambda} \Big) = h_{\rm p3}^2 / h_{\rm Tp \, n}^2 \,, \tag{13}$$

где: $h_{p\,3}^2 = \xi^{-1} \Big[P_{\text{ош доп}}, P_{\text{лт доп}}, \gamma^2 \Big(f_0, \vec{\lambda}, \alpha \Big) \Big]$ – энергетическое ОСШ, требуемое для обнаружения сигнала ССС ПРМ радиообнаружения средства РРТР с заданными вероятностями правильного обнаружения $P_{\text{по 3}}$ и ложной тревоги $P_{\text{лт 3}}$, при заданном угле α трансионосферного РРВ относительно вертикали, векторе параметров ионосферы $\vec{\lambda} = (l_s, h_3, \sigma_{\Delta N})$ и известном значении несущей частоты f_0 ; $h_{\text{Tp }n}^2 = \zeta^{-1} \Big\{ P_{\text{ош тр}}, f_0, n, R \Big[\Delta \rho, \Delta \rho_{\kappa} (f_0, \vec{\lambda}, \alpha) \Big] \Big\}$ – энергетическое ОСШ, требуемое для пространственно-разнесенного НК приеме сигналов на несколько $(n \ge 2)$ антенн с квадратичным сложением сигналов в ветвях разнесения ССС с требуемой вероятностью ошибки приема бита информации $P_{\text{ош тр}}$, при априорно известном количестве элементов *n* приемной АС и их пространственном разносе $\Delta \rho$, а также векторе параметров ионосферы $\vec{\lambda} = (l_s, h_3, \sigma_{\Delta N})$, угле α трансионосферного РРВ относительно вертикали и значении несущей частоты f_0 .

3. Определить в приложении MATLAB, при изменении значения несущей частоты f_0 от 30 до 100 МГц с шагом 1 МГц, на основе численных методов уточнения корня нелинейного уравнения

$$\gamma_{3c} = \gamma_{3c \text{ rp}} = \upsilon \left(P_{\text{OIII Tp}}, P_{\text{IIO 3}}, P_{\text{JIT 3}}, n, \Delta \rho, R, \gamma^2 \left(f_0, \vec{\lambda}, \alpha \right) \right) \Big|_{f_0 = f_0 \text{ rp}}$$
(14)

значение граничной ПНЧ $f_{0 rp}$, на которой КЭС ССС достигает требуемого значения $\gamma_{3c rp} = 13$ дБ с относительной (процентной) погрешностью не более 10^{-4} %.

4. По результатам решения задачи по пунктам 1 и 2 в приложении MATLAB, при изменении значения несущей частоты $f_{0 \text{ гр}}$ от 30 до 100 МГц с шагом 1 МГц, провести вычислительный эксперимент, позволяющий исследовать зависимость КЭС и значения граничной ПНЧ $f_{0 \text{ гр}}$ от изменения:

- 4.1. Количества элементов n приемной AC (n = 2, 3, ..., 10).
- 4.2. Пространственного разноса $\Delta \rho$ элементов приемной AC ($\Delta \rho = 200, 400, 600$ м).
- 4.3. СКО σ_{ΔN} флуктуаций электронной концентрации в неоднородностях ионосферы (σ_{ΔN} = (2...4)·10⁹ эл/м³).
- 4.4. Угла α трансионосферного распространения радиоволн относительно вертикали (α = 0; 0,7853981634; 1,0471975512; 1,3962634016 рад или α = 0, 45, 60, 80°).

5. Предусмотреть в приложении MATLAB, при изменении значения несущей частоты $f_{0 \text{ гр}}$ от 30 до 100 МГц с шагом 1 МГц, вычисление:

- 5.1. Значения энергетического ОСШ на входе ПРМ радиообнаружения $h_{\rm p\,3}^2$, необходимого для обнаружения с заданным качеством ($P_{\rm по\,3} = 0,99$, $P_{\rm лт\,3} = 10^{-4}$) сигнала ССС, на основе численных методов уточнения корня уравнения обнаружения (2) с относительной (процентной) погрешностью не более 10^{-4} %.
- 5.2. Значение ОСШ на входе ПРМ ЗсСС $h_{\text{тр}\,n}^2$, необходимое для обеспечения требуемой помехоустойчивости ($P_{\text{ош тр}} = 10^{-5}$) в радиолинии «ИСЗ-ЗсСС», на основе численных методов уточнения корня уравнения помехоустойчивости (9) с относительной (процентной) погрешностью не более 10^{-4} %.
- 5.3. Коэффициента *R* пространственной корреляции быстрых замираний в линейно разнесенных на эквидистантный интервал Δρ приемных антеннах, вычисляемого по формуле (12).

- 5.4. СКО фазовых сдвигов приходящих лучей σ_φ, рад, в радиоканале с трансионосферным распространением радиоволн, вычисляемый по формуле (7).
- 5.5. Параметра райсовских замираний (параметра Райса γ²), вычисляемого по формуле (6).

6. Предусмотреть в приложении MATLAB возможность хронометрировать временные затраты на вычисления КЭС ССС и др. параметров.

2. Методика автоматизированного определения коэффициента энергетической скрытности систем спутниковой связи в приложении MATLAB CoefficientOfEnergySecrecySatComSystem

Методика автоматизированного определения КЭС (γ_{3c}) ССС, использующих ПНЧ (до $f_0 = 30...100$ МГц) и пространственно-разнесенный прием сигналов на несколько ($n \ge 2$) антенн от радиообнаружения сигнала ПРМ средства РРТР разработана на основе использования математического моделирования и численных методов. Она ориентирована на реализацию в независимом приложении MATLAB (приложение 2), которому присвоено название Coefficient-OfEnergySecrecySatComSystem. Эта методика содержит три составляющие.

Первой составляющей методики является математическое моделирование вероятности правильного обнаружения ($P_{\text{по}}$) ПРМ радиообнаружения средства РРТР сигнала с райсовскими замираниями произвольной глубины $(0 \le \gamma^2 \le \infty)$ с учетом их зависимости от несущей частоты (f_0), значения энергетического ОСШ на входе ПРМ радиообнаружения $h_{p_3}^2$, необходимого для обнаружения с заданным качеством ($P_{\text{по} 3} = 0.99$, $P_{\text{лт 3}} = 10^{-4}$) и вектора параметров ионосферы $\vec{\lambda} = (l_s, h_3, \sigma_{\Delta N})$. При этом, используется известное [10] уравнение радиообнаружения (2), в котором аргументы $g_1(f_0, h^2, \vec{\lambda}, \alpha)$ и $h_{01}(f_0, h^2, \vec{\lambda}, \alpha, P_{\text{лт}})$ Q-функции Маркума (3) определяются выражениями (4) и (5), с учетом соотношений (6) и (7).

Второй составляющий методики является определение на основе численных методов уточнения корня уравнения:

1) обнаружения (2) энергетического ОСШ на входе ПРМ радиообнаружения $h_{p_3}^2$, необходимого для обнаружения сигнала ССС ПРМ радиообнаружения средства РРТР с заданными вероятностями правильного обнаружения $P_{\text{по 3}} = 0,99$ и ложной тревоги $P_{\text{лт 3}} = 10^{-4}$, при заданном угле α трансионо-сферного РРВ относительно вертикали, векторе параметров ионосферы $\vec{\lambda} = (l_s, h_3, \sigma_{\Delta N})$ и известном значении несущей частоты f_0 ;

2) помехоустойчивости (9) значения энергетического ОСШ на входе ПРМ ЗсСС $h_{\text{тр}\,n}^2$, требуемого для пространственно-разнесенного НК приеме сигналов на несколько ($n \ge 2$) антенн с квадратичным сложением сигналов в ветвях

разнесения с требуемой вероятностью ошибки приема бита информации $P_{\text{ош тр}} = 10^{-5}$, при априорно известном количестве элементов *n* приемной AC и их пространственном разносе $\Delta \rho$, а также векторе параметров ионосферы $\vec{\lambda} = (l_s, h_{\Im}, \sigma_{\Delta N})$, угле а трансионосферного PPB относительно вертикали и значении несущей частоты f_0 .

Указанные значения ОСШ $h_{p_3}^2$ и $h_{Tp\,n}^2$ производится на основе реализаций численных методов (метод половинного деления, метод хорд, метод Ньютона и метод Ньютона-хорд), рассмотренных в первой части статьи [1].

Третьей составляющей методики является определение КЭС ССС с ПНЧ, использующей разнесенный прием, а также граничной ПНЧ $f_{0 \text{ гр}}$, на которой КЭС ССС достигает требуемого значения $\gamma_{3c \text{ тр}} = 13 \text{ дБ}$, в соответствии с выражениями (13) и (14).

Поиск значения граничной несущей частоты, т. е. уточнение корней нелинейного уравнения (14) реализовано на основе использования численных методов (половинного деления и хорд) уточнения корней нелинейного уравнения с одним неизвестным вида:

$$\gamma_{\mathcal{P}}(f_0) - \gamma_{\mathcal{P}}(r_p) = \gamma_{\mathcal{P}}(f_0) - \gamma_{\mathcal{P}}(f_0) \Big|_{f_0 = f_0 r_p} = 0.$$
(15)

Алгоритм автоматизированного определения КЭС ССС с ПНЧ γ_{3c} , основанный на разработанной методике и иллюстрирующий взаимодействие пользователя и приложения MATLAB, представлен в виде диаграммы деятельности UML [12, 13] на рис. 3. Этот алгоритм состоит из 21 блока.

Блоки 1 и 21 определяют, соответственно, начало и конец работы алгоритма.

Блоки 2 и 20 являются типовыми для работы любого программного продукта под управлением операционной системы семейства Windows. Содержание остальных блоков рассматривается далее.

Блок 3 – Пользователь производит установку настроек приложения MATLAB.

Блок 4 – Пользователь производит выбор объекта вычислений в выпадающем меню. Для вычисления КЭС ССС пользователю необходимо выбрать пункт вычислений «1. Коэффициент энергетической скрытности (гамма_эс)».

Блок 5 – Приложение MATLAB осуществляет задание объекта вычислений в зависимости от выбора пользователя (блок 4).

Блок 6 – В зависимости от выбора объекта вычислений приложение MATLAB автоматически изменяет внешний вид интерфейса с учетом соответствующего набора исходных данных, необходимых для последующих расчетов.

Блок 7 – Пользователь производит ввод необходимых исходных данных, и выбор численных методов для расчетов КЭС ССС.

Блок 8 – Пользователь нажимает кнопку «Вычислить».

Блок 9 – Приложение MATLAB осуществляет задание исходных данных для последующих расчетов в зависимости от выбора пользователя (блок 7).

Блок 10 – Приложение MATLAB осуществляет определение вероятности правильного радиообнаружения сигнала $P_{\rm пo}$, используя уравнение радиообнаружения (2).

Блок 11 – Приложение МАТLAВ осуществляет определение ОСШ на входе ПРМ радиообнаружения средства РРТР $(h_{p_3}^2)$ и ПРМ ССС $(h_{Tp\,n}^2)$ в зависимости от выбора несущей частоты f_0 , вектора параметров ионосферы $\vec{\lambda} = (l_s, h_{\mathfrak{I}}, \sigma_{\Delta N})$ и параметров разнесенного приема $(n, \Delta \rho)$:



Рис. 3. Алгоритм автоматизированного определения КЭС ССС с ПНЧ

Блок 12 – Определение приложением МАТLAB КЭС ССС с ПНЧ, использующей разнесенный прием, а также граничной ПНЧ $f_{0 rp}$, на которой КЭС ССС достигает требуемого значения $\gamma_{3C rp} = 13$ дБ.

Блок 13 – Приложение MATLAB осуществляет отображение результатов вычислений: вывод значений КЭС ССС в форме таблицы и графиков зависимости КЭС ССС от несущей частоты.

Блок 14 – Пользователем осуществляется получение и анализ результатов определения КЭС ССС в приложении MATLAB.

Блок 15 – Приложение МАТLAB, в зависимости от выбора пользователя «Продолжить» или «Завершить» работу с ним, осуществляет переход к блоку выбора 16, если пользователь решил продолжить вычисления, или к блоку 17, если пользователь решил прекратить дальнейшие вычисления выбранного объекта вычислений.

Блок 16 – Приложение МАТLAB, в зависимости от выбора пользователя «Без очистки» или «С очисткой» полученных результатов определения КЭС ССС, осуществляет переход к блокам 3 и 4, если пользователь решил продолжить вычисления без очистки, или к блоку 17, если пользователь решил произвести очистку полученных результатов определения КЭС ССС, то в этом случае данные таблиц «Варианты исходных данных» и «Результаты вычислений коэфф. энерг. скрытности ССС» будут очищены, а графики зависимости КЭС ССС от частоты стерты.

Блок 17 – Пользователь нажимает кнопку «Очистить».

Блок 18 – Приложение МАТLAB, в зависимости от выбора пользователя «С сохранением результатов вычислений» или «Без сохранения» полученных результатов определения КЭС ССС, осуществляет переход к блоку 19, если пользователь решил сохранить результаты вычислений, или к блоку 20, если пользователь решил завершить вычисления без сохранения полученных результатов определения КЭС ССС.

Блок 19 – Пользователь нажимает кнопку «Сохранить». В этом случае данные таблиц «Варианты исходных данных» и «Результаты вычислений коэфф. энерг. скрытности ССС» будут сохранены на жестком диске компьютера в формате текстового файла, т. е файла с расширением *.txt.

3. Результаты вычислительного эксперимента и их анализ

3.1. Зависимость коэффициента энергетической скрытности и значения граничной частоты в случае пространственно-разнесенного приема на четыре антенны

Как было показано ранее в первой части статьи [1], известен способ обеспечения энергетической скрытности ССС от обнаружения сигналов при близком (на удалении не более 10 км) размещении ПРМ радиообнаружения средства РРТР от ПРМ ЗсСС [2].

Напомним, что автор этого способа утверждает, что даже при высоких требованиях к качеству обнаружения сигналов ($P_{\text{по 3}} = 0.99$ и $P_{\text{лт 3}} = 10^{-4}$) и

помехоустойчивости их приема ($P_{\text{ош тр}} = 10^{-5}$) потенциально возможно достижение высокой энергетической скрытности ССС на уровне КЭС равном $\gamma_{\text{эс}} = 14$ дБ при выполнении следующих условий [2]:

- в ПРМ обнаружения используется схема не автокорреляционного (энергетического) приема, а оптимальной некогерентной обработки сигналов;
- вместо традиционно используемых несущих частот f₀ = 1...10 ГГц в ССС используются пониженные несущие частоты до f₀ = 30...100 МГц, на которых возникают рэлеевские замирания принимаемых сигналов;
- в ЗсСС реализован пространственно-разнесённый приём сигналов на четыре (n = 4) антенны.

Для того, чтобы убедится в справедливости данного утверждения исследуем в приложении MATLAB зависимость КЭС ССС с ПНЧ γ_{3c} и граничной частоты $f_{0 rp}$ для случая пространственно-разнесённого приёма сигналов, на четыре антенны.

Такие исследования, в соответствии с постановкой общей задачи, проведем при следующих исходных данных (рис. 4): $\sigma_{\Delta N} = 2 \cdot 10^9 \text{ эл/м}^3$, $l_s \approx 400 \text{ м}$, $h_3 \approx 2,5 \cdot 10^5 \text{ м}$, $\alpha = 1,1344640138$ рад или $\alpha = 65^\circ$, $P_{\text{ош тр}} = 10^{-5}$, $P_{\text{по 3}} = 0,99$, $P_{\text{лт 3}} = 10^{-4}$, $\Delta \rho = 400 \text{ м}$, $n = 4 \text{ и} \gamma_{\text{эс тр}} = 0 \text{ дБ}$ (именно такое требуемое значение КЭС рассматривалось в качестве условия обеспечения энергетической скрытности ССС с ПНЧ в статье [2]).

1. Коэффициент энергетической скрытности (гамма_эс)												
Численный метод												
эл/м.кvб. ls, м h э, км αο шт. Бисекций												
2 ▼ 400 ▼ 250 ▼ 65 ▼ 4 ▼ Бисекций ▼ Прием												
fmin, МГц fmax, МГц Рпоз Рлтз Роштр Др, м узстр, дБ												
30 100 0.99 ▼ 10^(-4) ▼ 10^(-5) ▼ 400 0 ▼ У Метка У 90∘												

Рис. 4. Фрагмент главного окна приложения MATLAB с исходными данными для проведения расчетов

В процессе исследований будем изменять значение ПНЧ f_0 от 30 до 100 МГц с шагом 1 МГц.

Фрагмент главного окна приложения MATLAB с результатами расчетов КЭС ССС с ПНЧ γ_{3c} и граничной частоты $f_{0 rp}$ при этом принимает вид, представленный на рис. 5.

Резу	льтаты выч	Грани	ич. част. 📃 Г	рафик				
	30, МГц	31, МГц	32, МГц	33, МГц	34, M		fo гр, МГц	
1	13.0749	12.9767	12.8670	12.7455	12.6	1	78.2120	

Рис. 5 Фрагмент главного окна приложения MATLAB с результатами расчетов КЭС ССС с ПНЧ γ_{3c} и граничной частоты

График зависимости КЭС ССС $\gamma_{3c}(f_0)$ и значения граничной несущей частоты $f_{0 \text{ гр}}$ для случая пространственно-разнесённого приёма сигналов, на четыре антенны показаны на рис. 6.

Выборка из результатов расчетов зависимости КЭС ССС γ_{3c} для значений несущей частоты $f_0 = 30, 40, 50, \dots, 100$ МГц приведена в таблице 2.

Анализ результатов расчетов КЭС ССС с ПНЧ γ_{3c} и граничной частоты (рис. 5), графика на рис. 6 и данных таблицы 2 позволяет сделать следующие выводы:

- максимум КЭС, равный $(\gamma_{3c})_{max} = 13,0749$ достигается при значении ПНЧ $f_0 = 30$ МГц;
- при изменении значении несущей частоты f_0 от 30 до 100 МГц значение КЭС ССС γ_{3c} монотонно убывает от 13,0749 до -4,3515 дБ;
- значение граничной частоты при $\gamma_{3c \text{ тр}} = 0$ дБ $f_{0 \text{ гр}} = 78,2120$ МГц;
- рабочий диапазон частот, в пределах которого обеспечивается энергетическая скрытность анализируемой ССС на уровне не хуже $(\gamma_{3c Tp})_{\pi E} = 0$ дБ, простирается от 30 МГц и до $f_{0 Tp} \cong 78,2120$ МГц.



Рис. 6. Графики зависимости КЭС ССС $\gamma_{3c}(f_0)$ и значения граничной несущей частоты $f_{0 \text{ гр}}$ для случая пространственно-разнесённого приёма сигналов, на четыре антенны (n = 4 шт.)

			_					
				f_0	₎ , МГц			
	30	40	50	60	70	80	90	100
γ _{эс} , лБ	13,0749	11,5703	9,0066	5,7412	2,3851	-0,4593	-2,6550	-4,3515

Таблица 2 – Выборка из результатов расчетов зависимости КЭС ССС у_{эс}

Таким образом, убеждаемся, что расхождение в досягаемом уровне КЭС ССС с ПНЧ по сравнению с [2] незначительно, т. к. оно составляет всего 1 дБ, что является вполне приемлемым.

Однако обращает на себя внимание, то обстоятельство, что по утверждению автора статьи [2], достижение высокой энергетической скрытности ССС на уровне КЭС равном $\gamma_{3c} = 14$ дБ происходит именно на тех частотах из диапазона ПНЧ $f_0 = 30...100$ МГц, на которых возникают рэлеевские замирания принимаемых сигналов. Логично предположить, что такой частотой как раз и является частота $f_0 = 30$ МГц или частоты в её окрестности.

Для того чтобы убедится в этом выполним в приложении MATLAB расчеты СКО фазового фронта волны (рис. 7) и параметра райсовских замираний (параметра Райса) (рис. 8) при указанных ранее исходных данных (рис. 4).



Рис. 7. График изменения с частотой СКО фазового фронта волны



Рис. 8. График изменения с частотой параметра Райса

Выборка из результатов расчетов СКО фазового фронта волны σ_{φ} и параметра Райса γ^2 для значений несущей частоты $f_0 = 30, 40, 50, ..., 100$ МГц приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Выборка из результатов расчетов СКО фазового фронта волны σ_{ϕ}

и параметра Райса γ^2

		f_0 , М Γ ц												
	30	40	50	60	70	80	90	100						
σ _φ , рад.	1,1552	0,86641	0,69313	0,57761	0,49509	0,4332	0,38507	0,34656						
γ^2	0,35738	0,89413	1,6214	2,5251	3,6001	4,8442	6,2564	7,8359						

С учетом данных таблицы 3, и графиков на рис. 7 и рис. 8 видно, что с ростом частоты СКО фазового фронта волны монотонно убывает от 1,1552 до 0,34656 рад, а параметра Райса, наоборот, возрастает от 0,35738 до 7,8359. При этом, максимальное значение СКО фазового фронта волны $(\sigma_{\phi})_{max} = 1,1552$ рад и минимальное значение параметра Райса $(\gamma^2)_{min} = 0,35738$ достигаются, как раз на частоте $f_0 = 30$ МГц.

Это, явно свидетельствует в пользу того, что на указанной частоте возникают рэлеевские замирания принимаемых сигналов или, более точно близкие к рэлеевским или, говоря иначе, квазирэлеевские замирания принимаемых сигналов, т. к. в случае чисто рэлеевских замираний параметр Райса должен быть равен нулю. В рассматриваемом же случае, параметр Райса хотя и мал по величине, но нулю не равен.

С целью анализа характера изменения графика КЭС ССС на рис. 6 построим, используя приложение МАТLАВ, в одной системе координат графики изменения с частотой параметров $h_{\rm P3}^2$ и $h_{\rm Tp4}^2$, которые и определяют его, рис. 9.



Рис. 9. График изменения с частотой параметров $h_{p_3}^2$ и $h_{Tp\,4}^2$, входящих в формулу (13) для вычисления КЭС ССС: 1) $h_{p_3}^2$; 2) $h_{Tp\,4}^2$

Выборка из результатов расчетов параметров $h_{p_3}^2$ и $h_{rp\,4}^2$ для значений несущей частоты $f_0 = 30, 40, 50, ..., 100$ МГц приведена в таблице 4.

Таблица 4 – Выборка из результатов расчетов параметров И	<i>i</i> ² _{p3}	и $h_{\mathrm{Tp}4}^2$
--	-------------------------------------	------------------------

$f_0, M \Gamma$ ц	30	40	50	60	70	80	90	100
$h_{ m p{}_3}^2,$ дБ	29,393	28,527	26,865	24,57	22,134	20,112	18,641	17,588
$h_{{ m тр}4}^2,$ дБ	16,318	16,956	17,858	18,829	19,749	20,572	21,296	21,94

Из анализа графика на рис. 9 и данных таблицы 4 следуют выводы:

– на частоте $f_0 = 30$ МГц достигается максимум параметра $h_{p_3}^2$, равный $\left(h_{p_3}^2\right)_{\max} = 29,393 \text{ дБ}$ и минимум параметра $h_{\text{тр}\,4}^2$, равный $\left(h_{\text{тр}\,4}^2\right)_{\min} = = 16,318 \text{ дБ};$

– при изменении значении несущей частоты f_0 от 30 до 100 МГц значение параметра $h_{\rm p\,3}^2$ монотонно убывает от 29,393 до 17,588 дБ, а значение параметра $h_{\rm Tp\,4}^2$, наоборот, монотонно возрастает от 16,318 и до 21,94 дБ.

Убывание параметра $h_{\rm p\,3}^2$ с ростом значения несущей частоты f_0 от 30 до 100 МГц можно объяснить соответствующим ростом с частотой параметра Райса (рис. 8). Как было показано в первой части статьи [1], при этом увеличивается мощности регулярной (не случайной) составляющей принимаемого сигнала, следствием этого является уменьшение энергетического ОСШ, требуемого для обнаружения сигнала ССС ПРМ радиообнаружения средства РРТР с заданными вероятностями правильного обнаружения $P_{\rm no\,3}$ и ложной тревоги $P_{\rm лт\,3}$. Рост же параметра $h_{\rm Tp\,4}^2$ с изменением значения несущей частоты f_0 от 30 до 100 МГц можно объяснить особенностями применения пространственно-разнесенного приема в зависимости от значения коэффициента пространственной корреляции быстрых замираний R в линейно разнесенных на эквидистантный интервал $\Delta \rho$ элементах приемной AC, вычисляемого по формуле (12).

Как известно [14, 15], изменение коэффициента корреляции *R* от 0,05 до 0,99 приводит к существенному повышению требуемого ОСШ в ветвях разнесения $h_{\rm Tp}^2$, необходимого для обеспечения требуемой вероятности ошибки приема бита информации $P_{\rm oш\ Tp}$ в ПРМ ЗсСС. В частности, для обеспечения $P_{\rm out\ Tp} = 10^{-5}$ и пространственно-разнесенном приеме на четыре антенны (n = 4) значения требуемого ОСШ в ветвях разнесения $h_{\rm Tp}^2$ может изменяться от 16 до 30 дБ [14, 15]. С учетом этого обстоятельства, рассчитаем и построим, используя приложение МАТLAB, график изменения с частотой коэффициента пространственной корреляции быстрых замираний *R* в линейно разнесенных на эквидистантный интервал $\Delta \rho = 400$ м элементах приемной АС (рис. 10). Выборка из результатов расчетов коэффициента *R* пространственной корреляции быстрых замираний *f* в таблице 5.

Анализа графика на рис. 10 и данных таблицы 5 приводит к следующим выводам:

- на частоте $f_0 = 30$ МГц достигается минимум коэффициента *R*, равный $R_{\min} = 0,26329$;
- при изменении значении несущей частоты f₀ от 30 до 100 МГц значение коэффициента *R* монотонно возрастает от 0,26329 до 0,88683.



Рис. 10. График изменения с частотой коэффициента *R* пространственной корреляции быстрых замираний в линейно разнесенных на эквидистантный интервал Δρ = 400 м приемных антеннах

Таблица 5 – Выборка из результатов расчетов коэффициента *R* пространственной корреляции быстрых замираний

	mpee rp		nen kepp	•miqiiii e		sampan		
$f_0, M \Gamma$ ц	30	40	50	60	70	80	90	100
R	0,26329	0,47205	0,61852	0,71632	0,78261	0,82889	0,86219	0,88683

Таким образом, убеждаемся в том, что при изменении значении несущей частоты f_0 от 30 до 100 МГц коэффициент *R* пространственной корреляции быстрых замираний заметно возрастает от 0,26329 до 0,88683, т. е. диапазон изменения этого коэффициента составляет $\Delta R = 0,62354$.

Именно этим фактом и объясняется подобный характер изменения графика параметра $h_{\text{тр 4}}^2$ (рис. 8).

Следует отметить, что в статье [2] значение КЭС $\gamma_{3c} = 14$ дБ было получено для идеального случая отсутствия корреляции БЗ (R = 0), реализуемого только при бесконечном пространственном разнесении элементов приемной AC ($\Delta \rho = \infty$), что на практике не выполнимо. При конечном же разнесении элементов приемной AC ($\Delta \rho < \infty$) значение КЭС исследуемой ССС $\gamma_{3c} < 14$ дБ.

3.2. Зависимость коэффициента энергетической скрытности и значения граничной частоты от количества элементов приемной антенной системы

Исследование зависимости КЭС ССС с ПНЧ γ_{3c} и граничной частоты $f_{0 rp}$ от количества элементов приемной АС, при изменении значения несущей частоты f_0 от 30 до 100 МГц с шагом 1 МГц, в соответствии с постановкой

общей задачи, проведем в приложении МАТLAB для следующих исходных данных: $\sigma_{\Delta N} = 2 \cdot 10^9$ эл/м³, $l_s \approx 400$ м, $h_3 \approx 2,5 \cdot 10^5$ м, $\alpha = 1,1344640138$ рад или 65°, $P_{\text{ош тр}} = 10^{-5}$, $P_{\text{по 3}} = 0,99$, $P_{\text{лт 3}} = 10^{-4}$, $\Delta \rho = 400$ м, $\gamma_{3\text{с тр}} = 13$ дБ. При этом будем полагать, что количество элементов приемной АС принимает значения n = 2, 3, ..., 10.

Главное окно приложения MATLAB с результатами расчетов КЭС ССС с ПНЧ $\gamma_{\text{эс}}$ и граничной частоты $f_{0 \text{ гр}}$ при этом принимает вид, представленный на рис. 11. Графики зависимости КЭС ССС $\gamma_{\text{эс}}(f_0)$ и значения граничной несущей частоты $f_{0 \text{ гр}}$ от количества элементов приемной АС (n = 2, 3, ..., 10 шт.), показаны на рис. 12.

承 Co	efficien	tOfEnerg	ySecreo	:ySatC	omSy	stem								X
Опро	О программе 🏻 🍟													
Объе	Объект вычисления Вычислить													
1. Коэффициент энергетической скрытности (гамма_эс)														
64N×	б∆N×10^9. Антенн, Численный метод Удалить													
эл/м	.кvб.	ls, м	h_9, i	км	αο΄	шт.	бис	екциі	Ă	▼.	Обнаруя	кение	Coxpa	нить
2	▼]40	00 🔻	250	▼]6	5 💌	10	- Бис	екциі	й	•]	Прием		Загру	зить
fmin,	МГц fr	тах, МГц	Рпо	3	Рлта		Роштр	p /	∆р, м	уэс тр	, дБ			
30)	100	0.99	- ▼ 1	0^(-4)	▼ 10	0^(-5)	•	400	13 🔻	🔽 Мет	ka 🔽	900 Очист	тить
Вари	анты ис	ходных д	анных			Y_	эстр	обно	вить		🗍 🔲 Крат	гко	Проредить Выбрать к	аждый
	sdN, э	л/м.куб.	ls, м	Z, M	alpha	а, гр.	n, шт.	delt	taRo, м	Рпс	Рл	т	10 -	Ла
1	2.	0000e+09	400 2	250000		65	2	2	400	0.99.	1.0000	e- 🔺		да
2	2.0	0000e+09	400 2	250000		65	3		400	0.99	1.0000	e-🛄	🗸 Автосо	хран.
3	2.	0000e+09	400 2	250000		65	4	ł	400	0.99	1.0000	e-	Монохр	ом. гр.
4	2.	0000e+09	400 2	250000		65	5	; 	400	0.99.	1.0000	e- 🔻	🗸 Хроном	етраж
												•	The second	io i pan
Pes	ультать	ы вычисл	ений ко	эфф. э	нерг.	скрыт	ности	ссс	Гран	ич. ча	аст. 📃 Гј	рафик	7.4421	секунды
	30, N	1Гц 31	, МГц	32, N	ИГц	33, N	ЛГц	34		fo r	р, МГц		Метки f0нач, M	ΙГц
1	1.8	8709	1.7887	1.	6969	1.	5955	-	1		NaN		35 💌	
2	9.2	2942	9.2003	9.	0954	8.	9793		2		NaN	=	f0шаг, М	Гц
3	13.0	0749 1	2.9767	12.	8670	12.	7455	•	3		30.7632		5 🔻	
4	15.4	4278 1	5.3288	15.	2181	15.	0956		4		43.9817		05.000	
	•							•	5		50.2012	Ŧ	COHOB	

Рис. 11. Главное окно приложения MATLAB с результатами расчетов коэффициента энергетической скрытности ССС и значения граничной несущей частоты $f_{0 \text{ гр}}$

На рис. 11 и рис. 12 видно, что в рассматриваемом случае, когда количества элементов приемной AC равно двум (n = 2) и трем (n = 3), КЭС ССС $\gamma_{\rm эс}$ не достигает требуемого уровня $\gamma_{\rm эс тр} = 13$ дБ и поэтому соответствующие значения граничной несущей частоты $f_{0 \ гр}$ являются неопределенными $f_{0 \ гр} = NaN$.



Рис. 12. Графики зависимости КЭС ССС $\gamma_{\text{эс}}(f_0)$ и значения граничной несущей частоты $f_{0 \text{ гр}}$ от количества элементов приемной АС (n = 2, 3, ..., 10)

Выборка из результатов расчетов зависимости КЭС ССС γ_{3c} от количества (*n*) элементов приемной АС для значений несущей частоты $f_0 = 30, 40, 50, ..., 100$ МГц приведена в таблице 6.

Из анализа графиков на рис. 12 и данных таблицы 6 можно сделать следующие выводы:

- независимо от количества элементов приемной AC в случае изменения ПНЧ от 30 до 100 МГц, максимум КЭС γ_{эс} всегда достигается при значении ПНЧ f₀ = 30 МГц;
- для рассматриваемых исходных данных (таблица 2) М.-максиморум (maximum maximorum) КЭС ССС, равный (γ_{эс})_{max max} = 20,737 дБ, достигается при условии, что количество элементов приемной АС равно десяти (*n* = 10);
- при изменении значении несущей частоты f_0 от 30 до 100 МГц значение КЭС ССС γ_{3c} при количестве антенн n = 10 монотонно убывает от 20,737 до 5,2652 дБ;

- если количество элементов приемной AC равно десяти, то значение КЭС ССС не опускается ниже требуемого уровня 13 дБ (у_{эс тр} =13 дБ) при изменении значения ПНЧ f₀ от 30 МГц до f_{0 гр} = 64,2461 МГц;
 если количество элементов приемной AC равно двум (сдвоенный при-
- ссли количество элементов приемной АС равно двум (сдвоенный прием) или трем (строенный прием), то требуемое значение КЭС ССС $\gamma_{3c \text{ тр}} = 13$ дБ не обеспечивается.

Таблица 6 – Выборка из результатов расчетов зависимости КЭС ССС γ_{3c} от количества элементов приемной АС

	n,		$f_0, M \Gamma$ ц										
	ШТ.	30	40	50	60	70	80	90	100				
	2	1,8709	0,61456	-1,5444	-4,352	-7,2804	-9,7629	-11,662	-13,11				
	3	9,2942	7,8583	5,4105	2,2658	-1,0044	-3,811	-6,0068	-7,7217				
	4	13,075	11,57	9,0066	5,7412	2,3851	-0,45929	-2,655	-4,3515				
~	5	15,428	13,912	11,348	8,1236	4,841	2,053	-0,12458	-1,8277				
^ү эс,	6	17,07	15,571	13,059	9,9223	6,7131	3,9746	1,8393	0,16998				
ДБ	7	18,302	16,834	14,391	11,339	8,2	5,5171	3,4234	1,7866				
	8	19,274	17,841	15,469	12,494	9,4182	6,7872	4,7367	3,1345				
	9	20,069	18,673	16,367	13,46	10,44	7,8568	5,8466	4,2789				
	10	20,737	19,376	17,131	14,283	11,314	8,7734	6,8007	5,2652				

Результаты расчетов граничной частоты $f_{0 \text{ гр}}$ МГц, при $\gamma_{3\text{с тр}} = 13$ дБ и разном количестве (n = 2, 3, ..., 10 шт.) элементов приемной АС отображены в виде графика на рис. 13 и приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты расчетов граничной частоты f_{0 гр} при разном количе-

	п, шт.								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f_{0 \ rp}, M$ Гц	NaN	NaN	30,7632	43,9817	50,2012	54,7172	58,3773	61,4953	64,2461

стве (*n*) элементов приемной AC и $\gamma_{3c Tp} = 13 \ \text{дБ}$

Из анализа графика на рис. 13 и данных таблицы 7 следуют выводы:

- при увеличении количества элементов приемной AC, используемых при пространственно-разнесенном приеме сигналов в 3сCC с n = 4 до n = 10 шт., значение граничной несущей частоты $f_{0 \text{ гр}}$ увеличивается от $f_{0 \text{ гр}} = 30,7632$ МГц до $f_{0 \text{ гр}} = 64,2461$ МГц, т. е. диапазон рабочих пониженных несущих частот расширяется примерно на 34 МГц;
- при одновременном использовании пониженных частот и пространственно-разнесенном приеме сигналов в ЗсСС можно обеспечить значение КЭС ССС не ниже допустимого уровня 13 дБ (у_{эс тр} =13 дБ)

при изменении значении ПНЧ f_0 от 30 до 64,2461 МГц, но только если количество элементов приемной АС n = 10 шт.;

- для обеспечения значения КЭС ССС не ниже требуемого уровня 13 дБ (у_{эс тр} = 13 дБ) и перекрытия рабочего диапазона ПНЧ от 30 до 60 МГц, необходимо задействовать более восьми элементов приемной AC (*n* > 8);
- с увеличением количества элементов приемной AC граничная несущая частота $f_{0 \text{ гр}}$, соответствующая $\gamma_{\text{эс тр}} = 13 \text{ дБ}$, монотонно возрастает от 30.7632 но 64.2461 МГи т. о. проитрически в правова



от 30,7632 до 64,2461 МГц, т. е. практически в два раза.

Рис. 13. Графики зависимости значения граничной несущей частоты $f_{0 rp}$ от количества (*n*) элементов приемной AC

3.3. Зависимость коэффициента энергетической скрытности и значения граничной частоты от пространственного разноса элементов приемной антенной системы

Исследование зависимости КЭС ССС с ПНЧ $\gamma_{\rm 9c}$ и граничной частоты $f_{0 \rm rp}$ от количества элементов приемной AC, при изменении значения несущей частоты f_0 от 30 до 100 МГц с шагом 1 МГц, в соответствии с постановкой общей задачи, проведем в приложении МАТLAB для следующих исходных данных: $\sigma_{\Delta N} = 2 \cdot 10^9$ эл/м³, $l_s \approx 400$ м, $h_3 \approx 2.5 \cdot 10^5$ м, $\alpha = 1.1344640138$ рад или 65°, $P_{\rm 0III \rm Tp} = 10^{-5}$, $P_{\rm IIO \rm 3} = 0.99$, $P_{\rm JIT \rm 3} = 10^{-4}$, n = 6 шт., $\gamma_{\rm 9c \rm Tp} = 13$ дБ. При этом будем полагать, что пространственный разнос элементов приемной AC принимает следующие значения: $\Delta \rho = 200$, 400 и 600 м.

Главное окно приложения MATLAB с результатами расчетов КЭС ССС с ПНЧ γ_{3c} и граничной частоты $f_{0 rp}$ при этом принимает вид, представленный на рис. 14.

承 Coe	efficient(fEnerg	yySecre	cySat	ComSy	stem					R		x
О про	ограмме												ъ
Объе	кт вычис	ления										Вычислит	
1. Kose	ффициен	г энерг	етичес	жой ск	фытно	сти (г	гамма_:	<u>эс)</u>			•		_
6ΔN×1	10^9.				1	Антен	Чис	сленны	ый мет	год		удалить	
эл/м.	куб.	в, м	h_9,	км	αo	шт.	Бис	екций		•	Обнаружени	е Сохранить	•
2	▼ 400	-	250	•	65 💌	6	• Бис	екций		- T	Трием	Загрузить	
fmin, I	МГц fma	х, МГц	Рп	03	Рлт:	3	Роштр	p 🛆	р, м ү	эс тр,	дБ	Carpyonia	5
30	1	100	0.99	•	10^(-4)	-	10^(-5)	- 6	5 00 1	13 👻	🗸 Метка 🗸	900 Очистить	
Вариа	анты исхо	дных д	цанных			γ	_эс тр	обнов	ить		📃 Кратко	Проредить Выбрать кажды	ый
	sdN, эл	м.куб	. Is, м	Z, M	alph	а, гр.	n, шт.	delta	Ro, м	Рпо	Рлт		
1	2.00	00e+0	· 400	25000	10	65	. 6	5	200	0.99	. 1.0000e-04	4	
2	2.00	00e+0) 400	25000	0	65	6	5	400	0.99	1.0000e-04	4 🛛 Автосохран	н.
3	2.00	00e+09	9 400	25000	0	65	6	5	600	0.99	. 1.0000e-04	4 🔲 Монохром.	rp.
	•										•	Хронометра	аж
Pesy	ультаты	вычисл	тений к	юэфф.	энерг.	скры	тности	ссс	Гран	ич. ча	ст. 📃 Графи	4.8223 секу	нды
	30, MI	ц 31	I, МГц	32,	МΓц	33,	МГц	34, M		fo rp	, МГц	бонач, МГц	
1	14.74	57	14.5337	7 1/	4.3173	14	.0960	13.8	1	3	7.6243	40 💌	
2	17.06	98	16.9716	5 10	6.8618	16	5.7405	16.6	2	5	0.2012	f0шаг, МГц	
3	17.29	12	17.2354	4 1	7.1714	17	.0987	17.0	3	5	5.2365	0 👻	
	•							Þ				Обновить	



элементов приемной AC: $\Delta \rho = 200, 400$ и 600 м

Графики зависимости КЭС ССС $\gamma_{3c}(f_0)$ и значения граничной несущей частоты $f_{0 \text{ гр}}(f_0)$ от изменения пространственного разноса элементов приемной антенной системы $\Delta \rho = 200,400,600$ м, показаны на рис. 15.

Выборка из результатов расчетов зависимости КЭС ССС γ_{3c} от количества (*n*) элементов приемной АС для значений несущей частоты $f_0 = 30, 40, 50, ..., 100$ МГц приведена в таблице 8.

Из анализа графиков на рис. 15 и данных таблицы 8 можно сделать следующие выводы:

- при увеличении пространственного разноса элементов приемной AC $\Delta \rho$ с 200 до 400 м, максимум КЭС γ_{3c} при значении ПНЧ $f_0 = 30$ МГц увеличивается с 14,7457 до 17,0698 дБ, т. е. на 2,3241 дБ;
- при дальнейшем увеличении пространственного разноса элементов приемной AC (Δρ) с 400 до 600 м, максимум КЭС γ_{эс} при значении

ПНЧ $f_0 = 30$ МГц увеличивается с 17,0698 до 17,2912 дБ, т. е. всего на 0,2214 дБ, что, практически, в десять раз (на порядок) меньше, чем при увеличении пространственного разноса элементов приемной АС $\Delta \rho$ с 200 до 400 м;

 таким образом, увеличение пространственного разноса элементов приемной AC (Δρ) более 400 м, с точки зрения увеличения максимум КЭС γ_{эс} при значении ПНЧ f₀ = 30 МГц, представляется нецелесообразным.



Рис. 15. Графики зависимости КЭС ССС $\gamma_{\text{эс}}(f_0)$ и значения граничной несущей частоты $f_{0 \text{ гр}}(f_0)$ от изменения пространственного разноса элементов приемной АС $\Delta \rho$: 1) 200; 2) 400; 3) 600 м

Таблица 8 – Выборка из результатов расчетов зависимости КЭС ССС от изменения пространственного разноса элементов приемной АС

	Δρ,				f	₀ , МГц			
	М	30	40	50	60	70	80	90	100
~	200	14,7457	12,3889	9,4463	6,0370	2,6326	-0,2292	-2,4401	-4,1556
γ _{эс} ,	400	17,0698	15,5711	13,0590	9,9223	6,7131	3,9746	1,8393	0,1700
дЬ	600	17,2912	16,3235	14,3712	11,6144	8,6192	6,0186	3,9932	2,4185

Результаты расчетов граничной частоты $f_{0 \text{ гр}}$ МГц, при $\gamma_{3\text{с тр}} = 13$ дБ и при изменении пространственного разноса элементов приемной АС ($\Delta \rho = 200, 400, 600$ м) приведены в таблице 9 и отображены в виде графика на рис. 16.

Таблица 9 – Результаты расчетов граничной частоты $f_{0 rp}$ при изменении про-

странственного разноса элементов приемной AC и $\gamma_{3c Tp} = 13 \ \text{дБ}$



Рис. 16. Графики зависимости значения граничной несущей частоты $f_{0 \text{ гр}}$ от величины пространственного разноса элементов приемной AC

Из анализа графика на рис. 16 и данных таблицы 9 следуют выводы:

- при увеличении пространственного разноса элементов приемной AC Δρ с 200 до 400 м значение граничной частоты f_{0 гр} увеличивается с 37,6243 до 50,2012 МГц, т. е. на 12,5769 МГц;
- при дальнейшем увеличении пространственного разноса элементов приемной AC (Δρ) с 400 до 600 м, значение граничной частоты f_{0 гр} увеличивается с 50,2012 до 55,2365 МГц, т. е. незначительно, всего на 5,0353 МГц, а это почти в два с половиной раза меньше, чем при увеличении пространственного разноса элементов приемной AC (Δρ) с 200 до 400 м;
- таким образом, дальнейшее увеличение пространственного разноса элементов приемной AC (Δρ), т. е. более 400 м, с точки зрения роста значения граничной частоты f_{0 гр}, также, является нецелесообразным;
- следовательно, представляется оптимальным выбор пространственного разноса элементов приемной АС (Δρ) в пределах от 200 до 400 м,

т. к. в этом случае удается одновременно достичь, как максимума КЭС $\gamma_{\rm эc}$ в диапазоне от 14,7457 до 17,0698 дБ, так и значения граничной частоты $f_{0 \rm rp}$ в пределах от 37,6243 до 50,2012 МГц.

3.4. Зависимость коэффициента энергетической скрытности и значения граничной частоты от изменения среднеквадратического отклонения флуктуаций электронной концентрации в неоднородностях ионосферы

Дополним результаты проведенного анализа исследованием зависимости КЭС γ_{3c} и граничной частоты $f_{0 rp}$ в ССС с ПНЧ от флуктуаций электронной концентрации в неоднородностях ионосферы при следующих ограничениях:

$$2 \cdot 10^9 \le \sigma_{\Lambda N} \le 4 \cdot 10^9 \ [\Im \pi/m^3].$$
 (16)

После задания исходных данных и выполнения расчетов главное окно приложения MATLAB принимает вид, представленный на рис. 17.

承 Co	efficie	ntOfEn	erg	ySecre	cySat	ComSy	stem	1							
Опро	грам	ме													۲ ۲
Объе	кт вы	числени	я												Вычислить
1. Коэ	ффиці	иент эне	ерге	этичес	кой с	крытно	сти (гамма	а_эс)					•	
6ΔN×1	10^9.					,	Антен	чн. —	Іисле	нны	й мет	од			Удалить
эл/м.	куб.	ls, M		h_9,	км	α٥	шт.	Б	секц	ий		•	Обнару	жение	Сохранить
4	•	400	•	250	•	65 🔻	4	▼ 61	секц	ий		•	Прием		Загрузить
fmin, I	МГц	fmax, M	Гц	Рпс	3	Рлт	3	Рош	тр	Δp	, м ү	эс тр	дБ		Janpyanto
30		100		0.99	-	10^(-4)	•	10^(-5) -	40	00 1	3 🔻	🔽 Мет	ка 🗸	900 Очистить
Вариа	анты и	ісходны	хд	анных			1	(_эст	р обн	юви	ть	Ĩ	📃 Кра	тко	Проредить Выбрать каждый
	sdN,	эл/м.к	νб.	ls, м	Z, M	alph	а. гр.	п, ш	т. de	eltaF	Ко, м	Рпо	Рл	пт	
1		2.0000e	+09	400	25000	00	65		4		400	0.99.	1.0000)e- 🔺	10 🗸 Да
2	1	2.5000e	+09	400	25000	00	65		4		400	0.99	. 1.0000)e- =	🚺 Автосохран.
3	:	3.0000e	+09	400	25000	00	65		4		400	0.99	. 1.0000)e-	Монохром. гр.
4	:	3.5000e-	+09	400	25000	00	65		4		400	0.99	. 1.0000)e- 🔻	И Хронометраж
	٠ [F	V Aboutomer base
Pesy	ульта	ты вычі	исл	ений к	оэфф	энерг.	скры	тност	и СС	с	Грани	ич. ча	ст. 📃 Г	рафик	6.1957 секунды
	30,	МΓц	31,	, МГц	32	ΜΓц	33,	МΓц	34			fo r	, МГц		бонач, МГц
1	13	3.0749	1	2.9767	1	2.8670	12	2.7455			1	3	0.7632		40 💌
2	13	3.4386	1	3.4103	1	3.3764	13	3.3365	•	=	2	3	8.4555		f0шаг, МГц
3	13	3.5130	1	3.5068	3 1	3.4985	13	3.4878			3	4	6.1551	Ξ	10 🔻
4	13	3.5248	1	3.5238	3 1	3.5223	13	3.5201		-	4	5	3.8494		
	٠								•		5	6	1.5397	Ŧ	CONOBILE

Рис. 17. Результаты расчета коэффициента энергетической скрытности ССС и граничной частоты при изменении СКО флуктуаций ЭК в неоднородностях ионосферы

Выборка из результатов расчетов зависимости КЭС ССС от значения СКО флуктуаций ЭК в неоднородностях ионосферы для значений несущей частоты $f_0 = 30, 40, 50, ..., 100 \text{ M}$ Гц приведена в таблице 10.

Таблица 10 – Выборка из результатов расчетов зависимости КЭС ССС γ_{3c} от значения СКО флуктуаций ЭК в неоднородностях ионосферы

	N		f_0 , МГц										
	11	30	40	50	60	70	80	90	100				
	1	13,075	11,57	9,0066	5,7412	2,3851	-0,45929	-2,655	-4,3515				
24	2	13,439	12,867	11,57	9,5905	7,098	4,369	1,7634	-0,45929				
γ _{эс} ,	3	13,513	13,322	12,702	11,57	9,9618	7,9712	5,7412	3,4695				
дЬ	4	13,525	13,47	13,196	12,572	11,57	10,218	8,5717	6,7147				
	5	13,526	13,513	13,402	13,075	12,467	11,57	10,404	9,0066				

Графики зависимости КЭС ССС $\gamma_{\rm эc}(f_0)$ и значения граничной несущей частоты $f_{0 \rm rp}(f_0)$, при условии, что количество элементов приемной АС равном четырем (n = 4), от изменения СКО флуктуаций ЭК в неоднородностях ионосферы $\sigma_{\Delta N}$ в интервале от $2 \cdot 10^9$ до $4 \cdot 10^9$ эл/м³ с шагом $0,5 \cdot 10^9$ эл/м³ показаны на рис. 18.



Рис. 18. Зависимость коэффициента энергетической скрытности и граничной частоты от СКО флуктуаций ЭК в неоднородностях ионосферы при количестве

элементов приемной AC равном четырем (n = 4): 1) $\sigma_{\Delta N} = 2 \cdot 10^9$; 2) $\sigma_{\Delta N} = 2, 5 \cdot 10^9$; 3) $\sigma_{\Delta N} = 3 \cdot 10^9$; 4) $\sigma_{\Delta N} = 3, 5 \cdot 10^9$; 5) $\sigma_{\Delta N} = 4 \cdot 10^9$ эл/м³

Результаты расчетов граничной несущей частоты $f_{0 rp}$, МГц, от СКО флуктуаций ЭК в неоднородностях ионосферы приведены в таблице 11 и, отображены в виде графика на рис. 19.

Таблица 11 – Результаты расчетов зависимости граничной ПНЧ $f_{0 rp}$ от СКО флуктуаций ЭК в неоднородностях ионосферы при n = 4 и $\gamma_{3c rp} = 13$ дБ

	$\sigma_{\Delta N}$, эл/м 3						
	2.10^{9}	$2,5.10^9$	3·10 ⁹	$3,5.10^9$	4.10^{9}		
$f_{0 \ rp}$, МГц	30,7631	38,4555	46,1551	53,8493	61,5397		



Рис. 19. Графики зависимости значения граничной несущей частоты $f_{0 rp}$ от СКО флуктуаций ЭК в неоднородностях ионосферы

Из анализа полученных результатов расчетов КЭС ССС (рис. 18) и граничной несущей частоты (рис. 19), можно сделать выводы о том, что при изменении от СКО флуктуаций ЭК в неоднородностях ионосферы $\sigma_{\Delta N}$ в интервале от $2 \cdot 10^9$ до $4 \cdot 10^9$ эл/м³:

- максимальное значение КЭС ССС, достигаемое при значении несущей частоты $f_0 = 30$ МГц, практически остается неизменным (фактические изменения не превышают 0,526 дБ);
- граничная ПНЧ $f_{0 \text{ гр}}$, соответствующая $\gamma_{\text{эс тр}} = 13 \text{ дБ}$, линейно возрастает от 30,7631 до 61,5397 МГц;
- таким образом, увеличение СКО флуктуаций ЭК в неоднородностях ионосферы $\sigma_{\Delta N}$ в интервале от $2 \cdot 10^9$ до $4 \cdot 10^9$ эл/м³ не оказывает существенного влияния на максимальное значение КЭС ССС, а, в основном, приводит только к росту значения граничной ПНЧ $f_{0 \text{ гр}}$, примерно на 30 МГц.

4.5. Зависимость коэффициента энергетической скрытности и значения граничной частоты от угла трансионосферного распространения радиоволн относительно вертикали

Исследование зависимости КЭС ССС с ПНЧ γ_{3c} и граничной частоты $f_{0 \text{ гр}}$ от угла трансионосферного распространения радиоволн относительно вертикали, при изменении значения несущей частоты f_0 от 30 до 100 МГц с шагом 1 МГц, в соответствии с постановкой общей задачи, проведем в приложении МАТLAB для следующих исходных данных: $\sigma_{\Delta N} = 2 \cdot 10^9 \text{ эл/м}^3$, $l_s \approx 400 \text{ м}$, $h_3 \approx 2.5 \cdot 10^5 \text{ м}$, n = 6, $P_{\text{ош тр}} = 10^{-5}$, $P_{\text{по 3}} = 0.99$, $P_{\text{лт 3}} = 10^{-4}$, $\Delta \rho = 400 \text{ м}$, $\gamma_{3c \text{ тр}} = 13 \text{ дБ}$. При этом будем полагать, что угол а трансионо-сферного распространения радиоволн относительно вертикали принимает значения: 0; 0,7853981634; 1,0471975512; 1,3962634016 рад или 0, 45, 60, 80°.

После задания исходных данных и выполнения расчетов главное окно приложения MATLAB принимает вид, представленный на рис. 20.

•	Coe	effici	entOfEn	erg	ySecre	cySat	ComSy	stem							- • •
0	про	грам	име							10					¥
C	Объект вычисления Вычислить														
1.	1. Коэффициент энергетической скрытности (гамма_эс)														
6	ΔN×1	10^9.					A	Антени	Чис н.	сленн	ный ме	тод			Удалить
3	эл/м.	куб.	ls, M		h_s,	км	α٥	шт.	Бис	екций	i	•	Обнаружени	e	Сохранить
2		•	400	•	250		30 -	6	• Бис	екций	i	т п	Ірием		Загрузить
f	min, I	МГц	fmax, M	Гц	Рпо	0 3	Рлта	J	Роштр	p /	Δρ, м	үэс тр,	дБ		
	30		100		0.99	•]1	10^(-4)	▼]1	0^(-5)	•]	400	13 💌	🗸 Метка 🗸	/ 90	Очистить
В	ариа	нты	исходнь	іх д	анных			γ.	эс тр	обно	вить		📃 Кратко		Проредить Выбрать каждый
		sdN	, эл/м.к	уб.	ls, м	Z, M	alpha	а, гр.	n, шт.	delt	aRo, м	Рпо	Рлт		10 т Па
	1		2.0000e	+09	400	250000	0	0	6		400	0.99	1.0000e- 4		
	2		2.0000e	+09	400	250000	D	45	6		400	0.99	1.0000e-		🗸 Автосохран.
	3		2.0000e	+09	400	250000	D	65	6		400	0.99	1.0000e-		Монохром. гр.
	4		2.0000e	+09	400	250000	D	80	6	5	400	0.99	1.0000e- 🔻	-	VOONOMETORY
		•											•		М Аропометраж
	Pesy	ульта	аты выч	исл	ений к	юэфф.	энерг.	скрыт	ности	ccc	Гран	нич. час	ст. 🔲 Графи	IK	5.7361 секунды
Γ		30,	, МГц	31	, МГц	32,	МГц	33, N	ИГц	34		fo rp	, МГц	7	f0нач, МГц
	1	1	4.1258	1	3.7128	3 13	.2823	12.	.8360		1	32	2.6325		40 💌
	2	1	5.8091	1	5.5508	3 15	.2752	14.	9830	1	2	38	8.8092		f0шаг, МГц
	3	1	7.0698	1	6.9716	3 16	.8618	16.	7405		3	50	0.2012		10 💌
	4	1	7.5136	1	7.5094	4 17	.5037	17.	4963	1.4	4	78	8.3176		05407471
L		•								Þ.					Ооновить

Рис. 20. Результаты расчета коэффициента энергетической скрытности ССС и граничной частоты при изменении угла α трансионосферного распространения радиоволн относительно вертикали Графики зависимости КЭС ССС $\gamma_{\rm эс}(f_0)$ и значения граничной несущей частоты $f_{0 \rm rp}(f_0)$, при условии, что количество элементов приемной АС равном шести (n = 6), от изменения значения угла α трансионосферного распространения радиоволн относительно вертикали в интервале от 0° до 80° с неравномерным шагом показаны на рис. 21.



Рис. 21. Зависимость коэффициента энергетической скрытности и граничной частоты от значения угла α трансионосферного распространения радиоволн относительно вертикали при количестве элементов приемной AC равном шести (n = 6): 1) $\alpha = 0$; 2) $\alpha = 45$; 3) $\alpha = 65$; 4) $\alpha = 80^{\circ}$

Выборка из результатов расчетов зависимости КЭС ССС от значения угла α трансионосферного распространения радиоволн относительно вертикали для значений несущей частоты $f_0 = 30, 40, 50, ..., 100$ МГц приведена в таблице 12.

Таблица 12 – Выборка из результатов расчетов зависимости КЭС ССС γ_{эс} от значения угла α трансионосферного распространения радиоволн относительно вертикали

	ao		f_0 , МГц										
	S.	30	40	50	60	70	80	90	100				
	0	14,1258	9,4201	4,7531	1,4210	-0,8867	-2,5998	-3,9406	-5,0293				
$\gamma_{\rm 3c}$,	45	15,8091	12,5447	8,3920	4,5718	1,7377	-0,3295	-1,9152	-3,1849				
дБ	65	17,0698	15,5711	13,0590	9,9223	6,7131	3,9746	1,8393	0,1700				
	80	17,5136	17,3697	16,8560	15,8749	14,4542	12,6823	10,6760	8,5788				

Результаты расчетов граничной несущей частоты $f_{0 \text{ гр}}$, МГц, от значения угла α трансионосферного распространения радиоволн относительно вертикали приведены в таблице 13 и, отображены в виде графика на рис. 22.

Таблица 13 – Результаты расчетов зависимости граничной ПНЧ $f_{0 \text{ гр}}$ от значения угла α трансионосферного распространения радиоволн относительно вертикали при n = 6 и $\gamma_{\text{эс тр}} = 13 \text{ дБ}$

	α°							
	0	80						
<i>f</i> _{0 гр} , МГц	32,6325	38,8092	50,2012	78,3176				



Рис. 22. Графики зависимости значения граничной несущей частоты *f*_{0 гр} от значения угла α трансионосферного распространения радиоволн относительно вертикали

Из анализа полученных результатов расчетов КЭС ССС и граничной несущей частоты, можно сделать выводы, что при изменении значения угла α трансионосферного распространения радиоволн относительно вертикали в интервале от 0 до 80°:

- максимальное значение КЭС ССС, достигаемое при значении несущей частоты $f_0 = 30$ МГц, увеличивается от 14,1258 до 17,5136 дБ, на 3,3878 дБ;
- граничная ПНЧ f_{0 гр}, соответствующая γ_{эс тр} =13 дБ, нелинейно возрастает от 32,6325 до 78,3176 МГц, т. е. примерно на 46 МГц, что практически составляет две трети диапазона ПНЧ от 30 до 100 МГц;

таким образом, чем больше значение угла α трансионосферного распространения радиоволн относительно вертикали, тем больший путь проходит радиоволна в неоднородной ионосфере при наклонном падении на неё и, тем больше достигается значение КЭС ССС в широком интервале ПНЧ, который простирается от 32 до 78 МГц.

Заключение

Анализ полученных результатов вычислительного эксперимента позволяет сделать следующие выводы:

1. Разработана методика автоматизированной оценки коэффициента энергетической скрытности ССС, центральной идеей, которой является применение вместо графических численных методов уточнения корней нелинейных уравнений обнаружения и помехоустойчивости, что позволило сократить временные затраты на проведение расчетов до единиц секунд и уменьшить относительную процентную погрешность определения этого параметра по сравнению с известными графоаналитическим методами не менее, чем на три порядка.

2. Эта методика реализована в независимом приложении MATLAB CoefficientOfEnergySecrecySatComSystem, которое обладает графическим интерфейсом пользователя. Эта методика отличается от известных тем, что она впервые интегрально объединяет все ранее полученные результаты работы, которые были получены в первой части данной статьи, с вычислительной мощью математической системы MATLAB, в интересах решения общей научной задачи исследования направленной на повышение энергетической скрытности ССС.

- 3. В результате вычислительного эксперимента установлено, что:
 - независимо от количества элементов приемной AC в случае изменения ПНЧ от 30 до 100 МГц, максимум КЭС (γ_{3c}) всегда достигается при значении ПНЧ $f_0 = 30$ МГц. При этом, чем больше количеств элементов приемной AC, тем выше значение КЭС. Например, для рассматриваемых исходных данных (таблица 1) М.-максиморум (maximum maximorum) КЭС ССС, равный (γ_{3c})_{max max} \cong 21 дБ, достигается при условии, что количество элементов приемной AC равно десяти;
 - если количество элементов приемной AC равно десяти, то значение КЭС ССС не опускается ниже требуемого уровня 13 дБ ($\gamma_{3c Tp} = 13 \text{ дБ}$) при изменении значения ПНЧ f_0 от 30 МГц до значения граничной частоты $f_{0 Tp} \cong 64 \text{ МГц}$;
 - если количество элементов приемной AC равно двум (сдвоенный прием) или трем (строенный прием), то требуемое значение КЭС ССС *γ*_{эс тр} =13 дБ не обеспечивается;
 - представляется оптимальным выбор пространственного разноса элементов приемной AC (Δρ) в пределах от 200 до 400 м, т. к. в этом случае удается одновременно достичь, как максимума КЭС (γ_{эс}) в

диапазоне от 14 до 17 дБ, так и значения граничной частоты $f_{0 \text{ гр}}$ в пределах от 38 до 50 МГц;

- увеличение СКО флуктуаций ЭК в неоднородностях ионосферы $\sigma_{\Delta N}$
- в интервале от $2 \cdot 10^9$ до $4 \cdot 10^9$ эл/м³ не оказывает существенного влияния на максимальное значение КЭС ССС, а, в основном, приводит только к росту значения граничной ПНЧ $f_{0 \text{ гр}}$, примерно, на 30 МГц;
- чем больше значение угла α трансионосферного распространения радиоволн относительно вертикали, тем больший путь проходит радиоволна в неоднородной ионосфере при наклонном падении на неё и, соответственно, тем больше достигается значение КЭС ССС в более широком интервале ПНЧ, который простирается от 30 и до, примерно, 78 МГц.
- 4. Введение в рассмотрение термина «граничная частота» ($f_{0 rp}$) в соответствии с определением «Граничная частота это частота, на которой коэффициент энергетической скрытности ССС достигает требуемого значения $\gamma_{3c rp}$ » позволило существенно упростить решение задачи определения поддиапазона рабочих частот ССС с ПНЧ, простирающегося от 30 и до $f_{0 rp}$ [МГц]. Однако при этом выбор требуемой частоты $f_{0 rp}$ из указанного поддиапазона, исходя из условия обеспечения КЭС ССС не хуже требуемого $\gamma_{3c}(f_0)|_{f_0=f_0 rp} \ge \gamma_{3c rp}$, не имеет однозначного решения и нуждается в дальнейших исследованиях.

Статья включает результаты диссертации автора на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Модели и методы оценки энергетической скрытности низкочастотных систем спутниковой связи» [16].

Приложение

Независимое приложение MATLAB CoefficientOfEnergySecrecySatComSystem

С целью реализации методики автоматизированного определения КЭС ССС разработано и реализовано независимое приложение MATLAB CoefficientOfEnergySecrecySatComSystem с графическим интерфейсом пользователя. Диаграмма вариантов использования (прецедентов) [12, 13] этого приложения представлена на рис. 23, где пунктирной линией обозначен его контекст.

В процессе реализации этого приложения использованы, рассмотренные в первой части данной статьи [1] численные методы уточнения корней нелинейного уравнения с одним неизвестным (метод половинного деления, метод хорд, метод Ньютона и метод Ньютона-хорд), реализованные в виде семи программных компонентов: combi.m, fh.m, regula_falsi.m, derivative.m, Newton.m, combi.m и fhr.m.



Рис. 23. Диаграмма вариантов использования приложения MATLAB CoefficientOfEnergySecrecySatComSystem

Диаграмма компонентов (Component Diagrams) приложения приведена на рис. 24. Эта диаграмма включает 15 типов различных компонентов (GUI, Axes, PushButton и др.) и девять артефактов (bisect.m, regula_falsi.m, Newton.m и др.), реализующих соответствующие компоненты.



Рис. 24. Диаграмма компонентов (Component Diagrams) приложения MATLAB CoefficientOfEnergySecrecySatComSystem

На рис. 24 видно, что компоненты bisect.m, regula_falsi.m, Newton.m, combi.m, fh.m, fhr.m и derivative.m связаны с компонентом GUI посредством 24 интерфейсов (по 12 предоставляемых и требуемых).

По этим интерфейсам передаются данные необходимые для работы компонентов bisect.m, regula_falsi.m, Newton.m, combi.m, fh.m, fhr.m и derivative.m, а также возвращаются рассчитанные значения результатов уточнения корня уравнений обнаружения (2), уравнения помехоустойчивости (9) и др.

Компоненты PushButton, Edit Text, Static Text, Pop-up Menu, Table и Axes (кратность компонентов показана на рис. 24) связаны с компонентом GUI отношением композитной агрегации.

Как следует из рис. 23, приложение MATLAB поддерживает семь базовых прецедентов: «Выбрать объект вычислений», «Задать исходные данные для расчетов», «Выбрать численный метод», «Сохранить результаты вычислений», «Загрузить варианты исходных данных и результатов вычислений», «Удалить варианты исходных данных и результаты вычислений» и «Хронометрировать временные затраты численных методов». Взаимодействие пользователя с приложением происходит с помощью графического интерфейса пользователя (GUI), реализованного в среде визуального программирования MATLAB GUIDE v.2.5 (рис. 25).

CoefficientOfEnergySecrecySatComSystem.fig	
File Edit View Layout Tools Help	
1 🖆 📰 🐰 🖻 🛍 🤊 💌 🛔 🎒 🏄 🛐 🛃 😫 🕪	
50 100 150 200 250 300 350 400 450 50	0 550 🔺
Объект вычисления Выч	ислить
Рush Button 1. Козффициент энергетической скрытности (гамма_эс)	
шш Slider 8- 6ΔN×10 ⁴ 9, Антенн, 4исленный метод 24	алить
	ранить
Check Box Section (100 - 200 - 0 - 2 - 0 - 0 - 0 - 2 - 0 - 0	рузить
100 0.99 ▼ 10^(-4) ▼ 10^(-5) ▼ 400 20 ▼ Метка 💟 900 Очи	истить
тит Static Text 🗧 Варианты исходных данныху_эс доп обновить 🔲 Кратко Выбрать	каждый –
Image: Pop-up Menu sdN, эл/м.куб. Is, м hэ, м alpha, гр. n, шт. deltaRo, м Pno Рлт 2	Да
	сохран.
Тещ Toggle Button 3 Поно	хром. гр.
Table	ометраж—
	секунды
	MEn
Button Group 1 A 1 A 20	
ActiveX Control R-2	МГц -
	овить
Tag: uit InitialValue Current Point: [28, 239] Position: [10, 152, 440.	110]

Рис. 25. Графический интерфейс пользователя в среде визуального программирования MATLAB GUIDE v.2.5

Пользователю приложения MATLAB предоставляется возможность выбрать объект вычислений из выпадающего списка, например, «Коэффициент энергетической скрытности (гамма_эс)» (рис. 26).

Объект вычисления
1. Коэффициент энергетической скрытности (гамма_эс)
1. Коэффициент энергетической скрытности (гамма_эс)
2. Заданное отношение сигнал/шум при обнаружении сигналов (h^2 p з)
3. Требуемое отношение сигнал/шум при приеме сигналов (h^2 тр n)
 Коэффициент пространственной корреляции (R)
СКО флуктуаций фазового фронта волны (сигма фи)
6. Параметр райсовских замираний (гамма в квадрате)

Рис. 26. Выбор объекта вычислений из выпадающего списка

Варианты использования «Задать исходные данные для расчетов» и «Выбрать численный метод» (рис. 23) реализуется при помощи визуальных компонентов Рор-ир Мепи и Edit Text, которые позволяют задать значения исходным данным для расчетов и выбрать численные методы (рис. 27). На рис. 25 и рис. 27 использованы следующие условные обозначения: « $\sigma\Delta N$ » – СКО флуктуаций электронной концентрации в неоднородностях ионосферы; «ls» – характерный размер ионосферных неоднородностей; « h_{3} кв» – эквивалентная толщина ионосферы; « a° » – угол трансионосферного PPB относительно вертикали, градусы; «Антенн, шт.» – количество антенн, используемых при пространственно-разнесенном приеме в ЗсСС (n > 2); «fmin» и «fmax» – минимальное и максимальное значение несущей частоты; «Pпо з», «Pлт з» – заданные значения вероятности правильного радиообнаружения и ложной тревоги при обнаружении сигнала ССС средством PPTP; «Рош тр» – требуемое значение ошибки приема бита информации в ЗсСС; « $\Delta\rho$ » – пространственный разнос антенн; « γ эс тр» – требуемое значение КЭС ССС.



Рис. 27. Визуальные компоненты Pop-up Menu и Edit Text, которые позволяют задать значения исходным данным и выбрать численные методы для расчетов

После запуска приложения MATLAB его главное окно принимает вид, показанный на рис. 28.

	CoefficientOfEnergySecrecySatComSystem															
0 г	ipo	грам	име													¥۲.
06	Объект вычисления										Вычислить					
1. K	. Коэффициент энергетической скрытности (гамма_эс) 🔻									•						
64	N _× 1	0^9					4	чтенн	Чис	сленн	ный ме	етод				Удалить
эл	I/M.I	куб.	ls	, м	h_9	, км	αο	шт.	'Бисе	екциі	й	-	Обна	руже	ние	Сохранить
2		•	400	-	250	-	65 🔻	6 -	Бис	екциі	й	-	Приен	м		
fm	in, I	ИГц	fmax	с МГц	Рп	0 3	Рлта		Рошт	0 (∆р. м	уэс т	р. дБ			загрузить
	30		1/	00	0.99	-	10^(-4)	- 10	0^(-5)	-	400	13 -	М 🔽	Іетка		900 Очистить
Ba	риа	нты	исхол	аных д	анных	(_ к	ратк	0	Проредить
		- dN			10.00		alabi			dali	P.o	Dev		Dar		Выбрать каждыи
1	-	saiv	, эл/т	и.куб.	IS, M	Z, M	aipna), rp. 1	п, шт.	den	tarto, r	M PIR		РЛ		10 🔻 Да
	,														Â	Автосохран.
															Ξ	
															+	monoxpom. rp.
		•												Þ		🗸 Хронометраж
F	Результаты вышислений коафф энерг, склытности ССС – Грании, цаст Срафик Сскунды															
_	,	20.1		24.44		,00φφ.	22.14			000					-	Метки
		30, 1	ИЦ	31, M	Гц 32	, MI ц	33, M	Гц 34,	, Міц	3.		tor	rp, Mi	ц		тонач, міц
	-									-		_				40 •
4	-									Ξ					Ξ	towar, mr ų
	;										3					0 -
4	•	4	-							P. I	4	4		•		Обновить
	_		_	_									111			

Рис. 28. Внешний вид главного окна приложения МАТLAB после его запуска

При этом, вариант использования «Коэффициент энергетической скрытности (гамма_эс)» (рис. 23) активируется пользователем при помощи кнопки «Вычислить» (рис. 28). В результате нажатия пользователем на эту кнопку в приложении MATLAB запускается вычислительный процесс оценки КЭС ССС с ПНЧ и появляется полоса прогресса, отображающая его ход (рис. 29).



Рис. 29. Полоса прогресса

После завершения расчетов откроется окно с графиком зависимости КЭС ССС от частоты в диапазоне ПНЧ от 30 до 100 МГц. На этом графике стрелкой указанно значение граничной ПНЧ $f_{0 \text{ гр}}$ (если такова существует), на которой КЭС ССС достигает требуемого значения $\gamma_{3c \text{ тр}} = 13 \text{ дБ}$ (рис. 30) и появятся записи в таблицах «Варианты исходных данных», «Результаты вычислений коэфф. энерг. скрытности ССС», «Гранич. част.» главного окна (рис. 31).



Рис. 30. Графики зависимости коэффициента энергетической скрытности ССС от частоты после выполнения первого вычисления

Вари	анты исходных	данных		Y.	_эс тр (обновить		📃 Кратко	Проредить Выбрать каждый
	sdN, эл/м.куб	б. Is, м	z, м alph	а, гр.	n, шт.	deltaRo,	м Рпо	Рлт	10 т Да
1	2.0000e+0	9 400 2	50000	65	6	4	00 0.99	1.0000e-04	
									Автосохран.
		🔲 Монохром. гр.							
	•	📝 Хронометраж							
Pes	ультаты вычис	<mark>5.5362</mark> секунды							
	30, МГц 3	31, МГц	32, МГц	33, 1	МГц	34, M	fo гр	, МГц	Метки f0нач, МГц
1	16.6189	16.5666	16.5072	16	.4404	16.3 _ :	1 5	4.9960	40 💌
	•					4			f0шаг, МГц 0 ▼ Обновить

Рис. 31. Главное окно приложения MATLAB после первого вычисления

Кроме того, если активирован визуальный компонент типа Check Box с надписью «Хронометраж», то в поле типа Edit Text с надписью «секунды» отобразятся временные затраты приложения MATLAB на выполнение вычислений. Как видно, на рис. 31, указанные временные затраты составляют 5,5362 с. Тем самым, подтверждается факт того, что разработанный в первой части статьи [1], метод оценки коэффициента энергетической скрытности систем спутниковой связи на основе численных методов в MATLAB, реально позволяет сократить указанные временные затраты на вычисления до единиц секунд.

Внешний вид главного окна приложения MATLAB после выполнения последующего вычисления КЭС, отличающегося значением количеством элементов приемной AC параметра (n = 10), показан на рис. 32.

В результате вычисления графики зависимости КЭС ССС от частоты примут вид, показанный на рис. 33.

На рис. 32 и 33 видно, что увеличение количества элементов приемной AC, с n = 6 до n = 10, приводит к увеличению:

а) примерно на 3 дБ максимального значения КЭС ССС на ПНЧ $f_0 = 30$ МГц со значения $\gamma_{3c max} = 16,6189$ дБ до $\gamma_{3c max} = 19,4277$ дБ;

б) примерно на 11,5 МГц значения граничной несущей частоты со значения $f_{0 rp} = 54,9960$ МГц до $f_{0 rp} = 66,4858$ МГц.

Кроме того, на рис. 32 видно, что временные затраты на выполнение второго вычисления составляют 4,4356 с, что на 1,1 с меньше, чем на первое.

CoefficientOfEnergySecrecySatCor	nSystem	- • -							
О программе 🔉									
Объект вычисления	Вычислить								
1. Коэффициент энергетической скры									
6∆N×10^9,	Численный метод	Удалить							
эл/м.кvб. ls, м h_э, км a	о шт. Бисекций 💌	Обнаружение Сохранить							
2 • 400 • 250 • 65	▼ 10 ▼ Бисекций ▼	Прием Загрузить							
fmin, МГц fmax, МГц Рпо з	Рлтз Роштр Др,м үзстр	, дБ							
30 100 0.99 💌 10^	(-4) 💌 10^(-5) 💌 400 13 💌	✓ Метка ✓ 90° Очистить							
Варианты исходных данных	ү_эс тр обновить	Кратко Выбрать каждый							
sdN, эл/м.куб. ls, м z, м а	lpha, гр. n, шт. deltaRo, м Рпо	Рлт 10 🔻 Да							
1 2.0000e+09 400 250000	65 6 400 0.99.	1.0000e-04							
2 2.0000e+09 400 250000	65 10 400 0.99.	1.0000е-04 📝 Автосохран.							
•		Хронометраж							
4.4356 CE									
Результаты вычислений коэфф. эн	ерг. скрытности ССС Гранич. ча	аст. Ірафик Метки							
30, МГц 31, МГц 32, МІ	тц 33, МГц 34, М for	р, МГц f0нач, МГц							
1 16.6189 16.5666 16.50	072 16.4404 16.3 1	54.9960 40 💌							
2 19.4277 19.3755 19.3	61 19.2493 19.1 2 6	66.4858 f0шаг, МГц							
		0 💌							
•		Обновить							

Рис. 32. Главное окно приложения MATLAB после второго вычисления



Рис. 33. Графики зависимости коэффициента энергетической скрытности ССС от частоты после выполнения второго вычисления

Напомним, что КЭС ССС (γ_{3c}), в соответствии с выражением (1), вычисляется по формуле $\gamma_{3c} = h_{p3}^2 / h_{Tp}^2$ или $(\gamma_{3c})_{db} = (h_{p3}^2)_{db} - (h_{Tp}^2)_{db}$, где h_{p3}^2 – значение ОСШ, необходимое для радиообнаружения сигнала ССС ПРМ радиообнаружения средства РРТР с заданными допустимыми вероятностями правильного радиообнаружения P_{по 3} и ложной тревоги P_{лт 3}, при известном угле а трансионосферного РРВ относительно вертикали (зенитный угол) и векторе параметров ионосферы $\vec{\lambda} = (h_{\mathfrak{H}}, \sigma_{\Delta N}, l_s)$ и значения несущей частоты $f_0; h_{\mathsf{Tp}}^2$ значение ОСШ, необходимое для пространственно-разнесенного НК приема сигналов на несколько ($n \ge 2$) антенн с квадратичным сложением сигналов в ветвях разнесения ЗсСС с требуемой вероятностью ошибки приема бита информации $P_{\text{ош тр}}$, при априорно известном количестве антенн *n* и их пространственном разносе $\Delta \rho$, а также векторе параметров ионосферы $\vec{\lambda} = (h_{\Im}, \sigma_{\Delta N}, l_s)$, угле αтрансионосферного PPB и значении несущей частоты f₀. Вычисление параметров $h_{p_3}^2$ и h_{Tp}^2 реализовано на основе численных методов поиска корней нелинейного уравнения с одним неизвестным, воплощенных в виде семи программных компонентов: combi.m, fh.m, regula falsi.m, derivative.m, Newton.m, combi.m и fhr.m, рассмотренных ранее в первой части статьи.

Из рис. 28 и 32 следует, что пользователю приложения МАТLAB предоставлена возможность выбора численного метода вычисления параметров $h_{p_3}^2$ и h_{Tp}^2 при помощи списков выбора «Обнаружение» и «Прием». Используя список выбора «Обнаружение» пользователь может сделать выбор одного из четырех численных методов вычисления параметра $h_{p_3}^2$: метода половинного деления, метода хорд, метода Ньютона и метода Ньютона-хорд (рис. 34). В списке выбора «Прием» пользователю доступны только два численных методов вычисления параметра h_{Tp}^2 : метод половинного деления и метод хорд (рис. 35).









На рис. 33, видно, что графики зависимости КЭС ССС от частоты $\gamma_{3c}(f_0)$ в диапазоне ПНЧ $f_0 \in 30...100$ МГц являются нелинейными. При этом, определение граничной частоты $f_{0 rp}$ сводится к поиску абсциссы точки пересечения соответствующего графика $\gamma_{3c}(f_0)$ с горизонтальной линией постоянного уровня $\gamma_{3c rp} = 13$ дБ.

Продолжая рассмотрение, следует отметить, что действуя аналогичным образом, пользователь приложения MATLAB может также исследовать влияние и других исходных данных для расчетов, например, компонентов вектора параметров ионосферы $\vec{\lambda} = (h_3, \sigma_{\Delta N}, l_s)$ на КЭС ССС и значение пониженной

граничной несущей частоты $f_{0 \text{ гр}} \in 30...100 \text{ МГц}$, на которой КЭС ССС достигает требуемого значения $\gamma_{\text{эс тр}}$ (по умолчанию $\gamma_{\text{эс тр}} = 13 \text{ дБ}$), выбрав необходимое значение $\gamma_{\text{эс тр}}$ из выпадающего списка (рис. 36).



Рис. 36. Выбор требуемого значения $\gamma_{\mathfrak{sc} \mathsf{тp}}$ коэффициента энергетической скрытности ССС из выпадающего списка

Вариант использования «Сохранить результаты вычислений» (рис. 23) реализуется за счет того, что данные таблиц «Варианты исходных данных» и «Результаты вычислений коэфф. энерг. скрытности ССС» могут быть сохранены на жестком диске компьютера в формате текстового файла, т. е файла с расширением *.txt. Для этого пользователь приложения MATLAB должен нажать кнопку «Сохранить». В результате откроется стандартное диалоговое окно выбора целевой директории и имени файла для сохранения таблицы вариантов исходных данных и результатов вычислений.

Вариант использования «Загрузить варианты исходных данных и результатов вычислений» (рис. 23) реализуется за счет того, что сохраненные ранее в текстовом файле данные таблиц «Варианты исходных данных» и «Результаты вычислений коэффициента энергетической скрытности ССС» могут быть впоследствии загружены в программный комплекс при помощи кнопки «Загрузить». При этом также будет открыто стандартное диалоговое окно выбора директории и имени файла для загружаемого тестового файла.

Вариант использования «Удалить варианты исходных данных и результаты вычислений» (рис. 23) реализуется за счет нажатия на кнопку «Удалить». Чтобы сделать эту кнопку доступной нужно предварительно сделать левый клик по любому столбцу таблицы вариантов исходных данных в пределах удаляемой строки (или строк). После нажатия кнопки «Удалить» появится окно подтверждения операции удаления.

Вариант использования «Хронометрировать временные затраты численных методов» (рис. 23) реализуется за счет визуальных компонентов Check Box с надписью «Хронометраж» и Edit Text с надписью «секунды». Если навести указатель мыши на текстовое поле с результатами хронометража и нажать правую кнопку мыши, то появится контекстное меню, позволяющее скопировать результаты хронометража в буфер обмена.

Установочный пакет (дистрибутив) приложения MATLAB CoefficientOfEnergySecrecySatComSystem, создан с помощью MATLAB

Compiler version: 6.1 (R2015b). Указанный компилятор MATLAB Compiler использует исполняемое ядро, называемое MATLAB Compiler Runtime (MCR). MCR поставляется вместе с MATLAB Compiler для распространения с независимыми приложениями и может быть установлено на компьютер конечного пользователя без дополнительных затрат. Поэтому с помощью расширения MATLAB Compiler создано два варианта исполняемого файла инсталлятора приложения:

- первый вариант объемом 7 Мбайт, требующий на этапе установки приложения доступ к Интернету для закачки необходимых компонентов MCR версии 9.0 (R2015b) общим объемом до 555 Мбайт;
- второй вариант объемом 493 Мбайт, не требующий на этапе установки приложения доступ к Интернету, т. к. все необходимые компоненты MCR уже изначально включены в состав исполняемого файла инсталлятора.

Системные требования к компьютеру пользователя для приложения MATLAB CoefficientOfEnergySecrecySatComSystem, созданного с помощью расширения MATLAB Compiler:

- операционная система семейства Windows: Windows 2003 Server R2 SP2, Windows 2008 Server SP2/R2, Windows Vista SP2, Windows XP SP3/x64 SP2, Windows 7, 8, 8.1, 10;
- процессор с поддержкой потокового SIMD-расширения (SSE2);
- свободное дисковое пространство: от 7 до 493 Мбайт в зависимости от наличия установленных компонентов MCR версии 9.0 (R2015b);
- оперативная память: рекомендуется 1 Гбайт;
- видеокарта с поддержкой OpenGL 3.3 с 1 Гбайт оперативной памяти.

Литература

1. Ляхов А. В. Повышение энергетической скрытности узкополосных сигналов систем спутниковой связи при трансионосферном распространении радиоволн через неоднородную ионосферу за счет понижения несущих частот и пространственно-разнесенного приема. Часть 1. Постановка задачи повышения энергетической скрытности и ее решение // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 4. С. 256-312. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-256-312

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. Андронов И. С., Финк Л. М. Передача дискретных сообщений по параллельным каналам. – М.: Сов. радио, 1971. – 408 с.

5. Егоров А. Т., Ломакин А. А., Пантенков Д. Г. Математические модели оценки скрытности спутниковых каналов радиосвязи с беспилотными

летательными аппаратами. Часть 1 // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 3. С. 19-26. doi:10.31854/1813-324X-2019-5-3-19-26.

6. Ломакин А. А., Пантенков Д. Г., Соколов В. М. Математические модели оценки скрытности спутниковых каналов радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами. Часть 2 // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 4. С. 37-48. doi: 10.31854/1813-324X-2019-5-4-37-48.

7. Перов А. И. Статистическая теория радиотехнических систем. – М: Радиотехника, 2003. – 400 с.

8. Агиевич С. Н., Луценко С. А. Оценка помехоустойчивости спутниковых систем радиосвязи с фазоманипулированными широкополосными сигналами // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические вопросы противодействия терроризму. 2018. № 123-124. С. 132-137.

9. Пестряков В. Б., Кузнецов В. Д. Радиотехнические системы. – М.: Радио и связь, 1985. – 376 с.

10. Ляхов А. В., Пашинцев В. П., Белов А. Д., Бессмертный М. Ю. Методика оценки вероятности правильного обнаружения сигналов с райсовскими замираниями // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012 № 3 (7). С. 21-26.

11. Пашинцев В. П., Солчатов М. Э., Гахов Р. П. Влияние ионосферы на характеристики космических систем передачи информации. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2006. – 191 с.

12. Пайлон Д. UML 2 для программистов. – СПб.: Питер, 2012. – 240 с.

13. Unified Modeling Language. – URL: https://www.omg.org/spec/UML/2.0/ (дата обращения: 15.01.2022).

14. Киселев В. Н., Еремин А. М., Манаенко С. С., Сенокосова А. В. Методика оценки помехоустойчивости систем тропосферной связи при коррелированных рэлеевских замираниях // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. № 6. С. 21-23.

15. Сенокосова А. В. Метод прогнозирования энергетической скрытности систем спутниковой связи при использовании пониженных частот и пространственно-разнесенного приема сигналов: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Ставрополь: СКГТУ, 2011. – 264 с.

16. Ляхов А. В. Модели и методы оценки энергетической скрытности низкочастотных систем спутниковой связи. Дис. ... канд. техн. наук: 1.2.2. – Ставрополь: СКФУ, 2021. – 201 с.

Reference

1. Lyakhov A. V. Increasing the energy secrecy of narrow-band signals of satellite communication systems during transionospheric propagation of radio waves through an inhomogeneous ionosphere due to a decrease in carrier frequencies and space-diversified reception. Part 1. Statement of the problem of increasing energy secrecy and its solution. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 4, pp. 256-312. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-256-312 (in Russian).

2. Chipiga A. F. Analiz energeticheskoi skrytnosti nizkochastotnykh sistem sputnikovoi sviazi ot obnaruzheniia signalov [Analysis of energy stealth of low-

frequency satellite communication systems from signal detection]. *Izvestiya SFedU*. *Engineering Sciences*, 2014, no. 2, pp. 209-216 (in Russian).

3. Chipiga A. F., Senokosova A. V. Zashchita informatsii v sistemakh kosmicheskoi sviazi za schet izmeneniia uslovii rasprostraneniia radiovoln [Information security in space communication systems by changing the conditions of propagation of radio waves]. *Cosmic Research*, 2007, vol. 45, no. 1, pp. 52-59 (in Russian).

4. Andronov I. S., Fink L. M. *Peredacha diskretnykh soobshchenii po parallel'nym kanalam* [Transmission of discrete messages over parallel channels]. Moscow, Soviet radio Publ., 1971. 408 p (in Russian).

5. Egorov A. T., Lomakin A. A., Pantenkov D. G. Matematicheskie modeli otsenki skrytnosti sputnikovykh kanalov radiosviazi s bespilotnymi letatel'nymi apparatami. Chast' 1 [Mathematical models for assessing the secrecy of satellite radio communication channels with unmanned aerial vehicles. Part 1]. *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2019, vol. 5, no. 3. pp. 19-26. doi: 10.31854/1813-324X-2019-5-3-19-26 (in Russian).

6. Lomakin A. A., Pantenkov D. G., Sokolov V. M. Matematicheskie modeli otsenki skrytnosti sputnikovykh kanalov radiosviazi s bespilotnymi letatel'nymi apparatami. Chast' 2 [Mathematical models for assessing the secrecy of satellite radio communication channels with unmanned aerial vehicles. Part 2]. *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2019, vol. 5, no. 4, pp. 37-48. doi: 10.31854/1813-324X-2019-5-4-37-48 (in Russian).

7. Perov A. I. *Statisticheskaia teoriia radiotekhnicheskikh sistem* [Statistical theory of radio engineering systems]. Moscow, Radiotekhnika, 2003. 400 p (in Russian).

8. Agiyevich S. N., Lutsenko S. A. Otsenka pomekhoustoichivosti sputnikovykh sistem radiosviazi s fazomanipulirovannymi shirokopolosnymi signalami [Evaluation of noise immunity of satellite radio communication systems with phase-shift keyed broadband signals]. *Enginery Problems. Series 16. Anti-Terrorist Engineering Means*, 2018, no. 123-124, pp. 132-137 (in Russian).

9. Pestryakov V. B., Kuznetsov V. D. *Radiotekhnicheskie sistemy* [Radiotechnical systems]. Moscow, Radio and communications, 1985. 376 p. (in Russian).

10. Lyakhov A. V., Pashintsev V. P., Belov A. D., Bessmertnyi M. Y. Metodika otsenki veroiatnosti pravil'nogo obnaruzheniia signalov s raisovskimi zamiraniiami [Methodology for estimating the probability of correct detection of signals with Rician fading]. *Radio and telecommunication systems*, 2012, no. 3 (7), pp. 21-26 (in Russian).

11. Pashintsev V. P., Solchatov M. E., Gahov R. P. *Vliianie ionosfery na kharakteristiki kosmicheskikh sistem peredachi informatsii* [Influence of the ionosphere on the characteristics of space information transmission systems]. Moscow, Publishing house of physical and mathematical literature, 2006. 191 p. (in Russian).

12. Paylon D. *UML 2 dlia programmistov* [UML 2 for programmers]. Saint Petersburg, Piter, 2012. 240 p. (in Russian).

at:

13. UnifiedModelingLanguage.Availablehttps://www.omg.org/spec/UML/2.0/ (accessed 15 January 2022) (in English).

14. Kiselev V. N., Eremin A. M., Manayenko S. S., Senokosova A. V. Metodika otsenki pomekhoustoichivosti sistem troposfernoi sviazi pri korrelirovannykh releevskikh zamiraniiakh [Methodology for assessing the noise immunity of tropospheric communication systems with correlated Rayleigh fading]. *Physics of Wave Processes and Radio Engineering Systems*, 2007, no. 6, pp. 21-23 (in Russian).

15. Senokosova A. V. *Metod prognozirovaniia energeticheskoi skrytnosti sistem sputnikovoi sviazi pri ispol'zovanii ponizhennykh chastot i prostranstvenno-raznesennogo priema signalov*. Diss. kand. tehn. nauk [Method for predicting the energy secrecy of satellite communication systems using low frequencies and space-diversified signal reception. Ph.D. Tesis]. Stavropol, North Caucasian State Technical University, 2011. 264 p. (in Russian).

16. Lyakhov A. V. *Modeli i metody otsenki energeticheskoi skrytnosti nizkochastotnykh sistem sputnikovoi sviazi*. Diss. kand. tehn. nauk [Models and methods for assessing the energy secrecy of low-frequency satellite communication systems. Ph.D. Tesis]. Stavropol, North-Caucasus Federal University, 2021. 201 p. (in Russian).

Статья поступила 10 ноября 2022 г.

Информация об авторе

Ляхов Алексей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем». Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интересов: влияние возмущений ионосферы на показатели качества систем спутниковой связи; математическое моделирование; численные методы и вычислительные эксперименты в MATLAB. E-mail: lyachov_st@mail.ru

Адрес: 355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1.

Increasing the energy secrecy of narrow-band signals of satellite communication systems during transionospheric propagation of radio waves through aninhomogeneous ionosphere due to a decrease in carrier frequencies and space-diversified reception

Part 2. Computational experiment to estimate the boundaries of increasing energy secrecy and analysis of its results

A. V. Lyakhov

The relevance is due to the fact that the solution of the problem of designing advanced satellite communication systems (SCS) should be based on an integrated approach, which involves taking into account all the parameters and restrictions that provide both the requirements for the efficiency of its operation, including the requirements for both noise immunity and its secrecy from means of radio and electronic

intelligence (REI). However, at the same time, the well-known method for determining the coefficient of energy secrecy (ECS) of the SCS is graphic-analytical. Therefore, it does not allow automating the process of determining the ECS using modern computer technology, which makes it difficult to solve the problem of designing promising SCS. Therefore, it does not allow automating the process of determining this indicator using modern computer technology, which makes it difficult to solve the problem of designing promising SCS. In the first part of the article, the numerical methods of bisection, chords, Newton and the Newtonchord method, which are traditionally used to refine the root of a nonlinear equation with one unknown, were considered and adapted to determine the values of the energy signal-to-noise ratio (SNR) at the input of a satellite earth station receiver communication and at the input of the radio detection receiver of the REI means. Thus, the necessary prerequisites have been implemented for the implementation of the methodology for the automated assessment of ECS SCS, which allows, even at the stage of pre-contract work, to determine the potential energy secrecy of the designed SCS, taking into account the capabilities of the party implementing the REI. The aim of the work is to analyse the results of a computational experiment to assess the boundaries of increasing the energy secrecy of narrow-band signals of satellite communication systems with reduced carrier frequencies. Results and their novelty. For the first time, the results of a computational experiment on estimating the boundaries of increasing the energy secrecy of narrow-band signals of satellite communication systems with reduced carrier frequencies are obtained and analysed with a change in the number and spatial separation of elements of the receiving antenna system, parameters of the inhomogeneous ionosphere and the angle of transionospheric propagation of radio waves. The practical significance lies in the fact that the results of the computational experiment carried out will be useful for technical specialists to substantiate the initial data necessary for carrying out calculations to refine the parameters of promising SCS, taking into account the simultaneous provision by them of the requirements, both for the required noise immunity and communication secrecy. In addition, these results may be of interest to scientists and applicants conducting scientific research in the field of satellite communications.

Keywords: low-frequency satellite communication system, Rician fading, transionospheric propagation of radio waves, numerical method, energy stealth coefficient, technique for automated estimation of the energy stealth coefficient, satellite communication system.

Information about Author

Alexey Vladimirovich Lyakhov – Ph.D. of Engineering Sciences. Associate Professor at the Department of Information Security of Automated Systems. North Caucasus Federal University. Field of research: influence of ionospheric disturbances on the quality indicators of satellite communication systems; mathematical modeling; numerical methods and computational experiments in MATLAB. E-mail: lyachov_st@mail.ru

Address: Russia, 355017, Stavropol, ul. Pushkina, 1.