

Научная статья
УДК 519.876.5
DOI: [10.34759/trd-2022-127-10](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-10)

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ РАДИОКАНАЛА СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ И РЕТРАНСЛЯЦИИ ДАННЫХ ПРИ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ ПЕРЕДАЧЕ СИГНАЛА

**Максим Сергеевич Бродский¹, Виталий Валерьевич Звонарев²,
Руслан Владимирович Хуббиев³, Андрей Витальевич Шерстюк⁴**

^{1,2,3,4}Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Санкт-Петербург, Россия

³vka@mil.ru

Аннотация. Рассмотрена задача оценивания помехоустойчивости радиоэлектронных средств системы спутниковой связи и ретрансляции данных при многопозиционной передаче сигнала. Для ее решения предложена математическая модель радиоканала, включающая в себя алгоритм оценки вероятности битовой ошибки в зависимости от отношения энергии бита к спектральной плотности мощности шума на заданном временном интервале. На основе предложенной модели разработана компьютерная модель радиоканала системы спутниковой связи и ретрансляции данных. Приведены результаты моделирования, показывающие зависимость мощности сигнала на входе приемной антенны от взаимной корреляции сигналов пространственно-разнесенных передающих радиоэлектронных средств.

Ключевые слова: помехоустойчивость, вероятность битовой ошибки, отношение сигнал/шум, математическое моделирование

Для цитирования: Бродский М.С., Звонарев В.В., Хуббиев Р.В., Шерстюк А.В. Компьютерная модель радиоканала системы спутниковой связи и ретрансляции данных при многопозиционной передаче сигнала // Труды МАИ. 2022. № 127. DOI: [10.34759/trd-2022-127-10](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-10)

Original article

COMPUTER MODEL OF THE SATELLITE COMMUNICATION AND DATA RELAY SYSTEM RADIO CHANNEL DURING MULTIPOSITION SIGNAL TRANSMISSION

Maxim S. Brodsky¹, Vitaly V., Zvonarev², Ruslan V. Khubbiiev³, Andrey V. Sherstyuk⁴
^{1,2,3,4}Military space Academy named after A.F. Mozhaisky, Saint Petersburg, Russia
³vka@mil.ru

Abstract. The paper proposes mathematical model of radio channel of the communication and data relay satellite system (CDRSS) in case of multi-position signal transmission by several spatially separated radio-electronic equipments. Based on the proposed mathematical model, computer model has been developed for estimating the noise immunity of signal reception under given technical limitations. The computer model under consideration makes it possible to calculate with high accuracy the values of the energy characteristics of radio-electronic equipments, such as the average radiated power of the equipments; transmitting (receiving) antenna gain; effective isotropically radiated power; ratio of signal bit energy to noise power spectral density; the ratio of the total signal power

to the noise power at the input of the receiving device, at which the required noise immunity of the CDRSS facilities is ensured.

A quantitative measure of radio-electronic equipments noise immunity is the probability of a bit error. To calculate the probability of a bit error, an algorithm for estimating the noise immunity of signal reception has been developed, which, unlike the existing ones, allows calculating the probability of a bit error for radio-electronic equipments space-separated emitting pairwise correlated signals in the direction of the receiving antenna of the satellite CDRSS.

The proposed algorithm allows you to calculate:

- spatial and temporal characteristics of radio visibility zones of transmitting radio-electronic and receiving equipments of CDRSS;
- energy characteristics of radio links;
- bit error probability.

The article gives an example of calculating bit error probability during multi-position signal transmission in the direction of the receiving antenna of satellite CDRSS, oriented towards the orbital electronic equipments. The simulation results testify to the correctness of the approach and make it possible to carry out systematic studies of the dependence of the energy characteristics of the receiving equipments of the CDRSS on the number of low-power transmitting equipments emitting pairwise correlated signals.

The proposed computer model can be used:

- to substantiate the tactical and technical requirements for a promising CDRSS;
- to assess the effectiveness of the functioning of the CDRSS in a complex electromagnetic environment;

– to justify the directions of modernization of the CDRSS.

Keywords: noise immunity, bit error probability, noise-to-signal ratio, math modeling

For citation: Brodsky M.S., Zvonarev V.V., Khubbiev R.V., Sherstyuk A.V. Computer model of the satellite communication and data relay system radio channel during multiposition signal transmission. *Trudy MAI*. 2022, no. 127. DOI: [10.34759/trd-2022-127-10](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-10)

Введение

Для оценки пропускной способности радиоканала связи, качества телекоммуникационного обмена между радиоэлектронными средствами (РЭС) системы спутниковой связи и ретрансляции данных (ССС и РД) необходимо использовать точные, адекватные и наглядные средства моделирования. Данные средства могут применяться на этапе проектирования, разработки, испытаний и эксплуатации ССС и РД, а также для снижения рисков (исключения проблемных вопросов), возникающих при проектировании отдельных узлов (подсистем) радиоэлектронной аппаратуры. Применение средств моделирования позволит с высокой точностью и надежным прогнозированием обосновать тактико-технические требования (ТТТ), предъявляемые к модернизируемым и разрабатываемым ССС и РД при имеющихся технических ограничениях [1-2].

С целью обоснования ТТТ к перспективной ССС и РД, выполнение которых позволит обеспечить заданную помехоустойчивость приема сигнала с различными видами модуляции, усовершенствован методический аппарат, представленный в работе [3], который учитывает функционирование средств ССС и РД в условиях

сложной электромагнитной обстановки при однопозиционном и многопозиционном применении передающих РЭС.

Обоснование ТТТ осуществляется на основании расчета допустимых энергетических параметров средств связи, обеспечивающих требуемое значение помехоустойчивости ССС и РД при заданных технических ограничениях. Количественной мерой помехоустойчивости РЭС является вероятность битовой ошибки [4-9].

Постановка задачи

Увеличение энергетического потенциала за счет нескольких разнесенных в пространстве передающих средств обеспечивается при излучении ими синфазных или взаимно коррелированных сигналов в точке приема [3]. Количество РЭС определяется по критерию минимизации значения энергетических характеристик передающих РЭС. При этом помехоустойчивость средств ССС и РД должна быть в заданных пределах. Пороговые значения помехоустойчивости средств ССС и РД могут корректироваться исходя из условий обстановки.

Необходимо определить требуемое количество пространственно-разнесенных передающих РЭС, обеспечивающих заданную вероятность битовой ошибки, при передаче сигнала на приемное средство КА ССС и РД. Для решения данной задачи необходимо определить минимально возможные значения энергетических характеристик: среднюю излучаемую мощность РЭС; коэффициент усиления передающей (приёмной) антенны; эффективную изотропно излучаемую мощность; отношение энергии бита сигнала к спектральной плотности мощности шума;

отношение суммарной мощности сигналов к мощности шума на входе приемного устройства РЭС, при которых обеспечивается требуемая помехоустойчивости средств ССС и РД.

Описание математической модели радиоканала ССС и РД

Для определения суммарной мощности синфазных сигналов на входе приемной антенны КА ССС и РД в статье разработана математическая модель радиоканала с гармоническими сигналами на одной частоте, имеющая следующие ограничения и допущения:

1. При применении одного передающего РЭС мощность сигнала на выходе приемной антенны P_{Σ} будет эквивалентна мощности сигнала этого средства.

2. При применении нескольких передающих РЭС мощность сигнала на выходе приемной антенны, с учетом коэффициента взаимной корреляции сигналов РЭС, будет рассчитываться по следующей формуле [3]:

$$P_{\Sigma} = L \cdot (P_c + r \cdot P_c(L - 1)), \quad (1)$$

где: L – количество РЭС,

r – коэффициент взаимной корреляции сигналов РЭС,

P_c – средняя излучаемая мощность одного РЭС.

3. Оценка вероятности битовой ошибки выполняется для пространственно-разнесенных РЭС, излучающих попарно коррелированные сигналы в направлении приемной антенны КА ССС и РД.

Основное предназначение предложенной модели является определение требуемого количества передающих РЭС, обеспечивающих заданную помехоустойчивости средств ССС и РД, показателем которой является вероятность битовой ошибки. Оценивание помехоустойчивости средств ССС и РД при многопозиционном применении передающих средств выполняется в соответствии с алгоритмом, блок-схема которого представлена на рисунках 1, 2.

На 1 шаге алгоритма формируются исходные данные, состоящие из:

– параметров наземных РЭС (НРЭС):

$$B = \{b_j, j = \overline{1, M_1}\}, b_j = \langle Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 \rangle,$$

где: Y_1 – название средства,

Y_2 – тип системы,

Y_3 – наименование, широта и долгота расположения,

Y_4 – параметры аппаратуры потребителя.

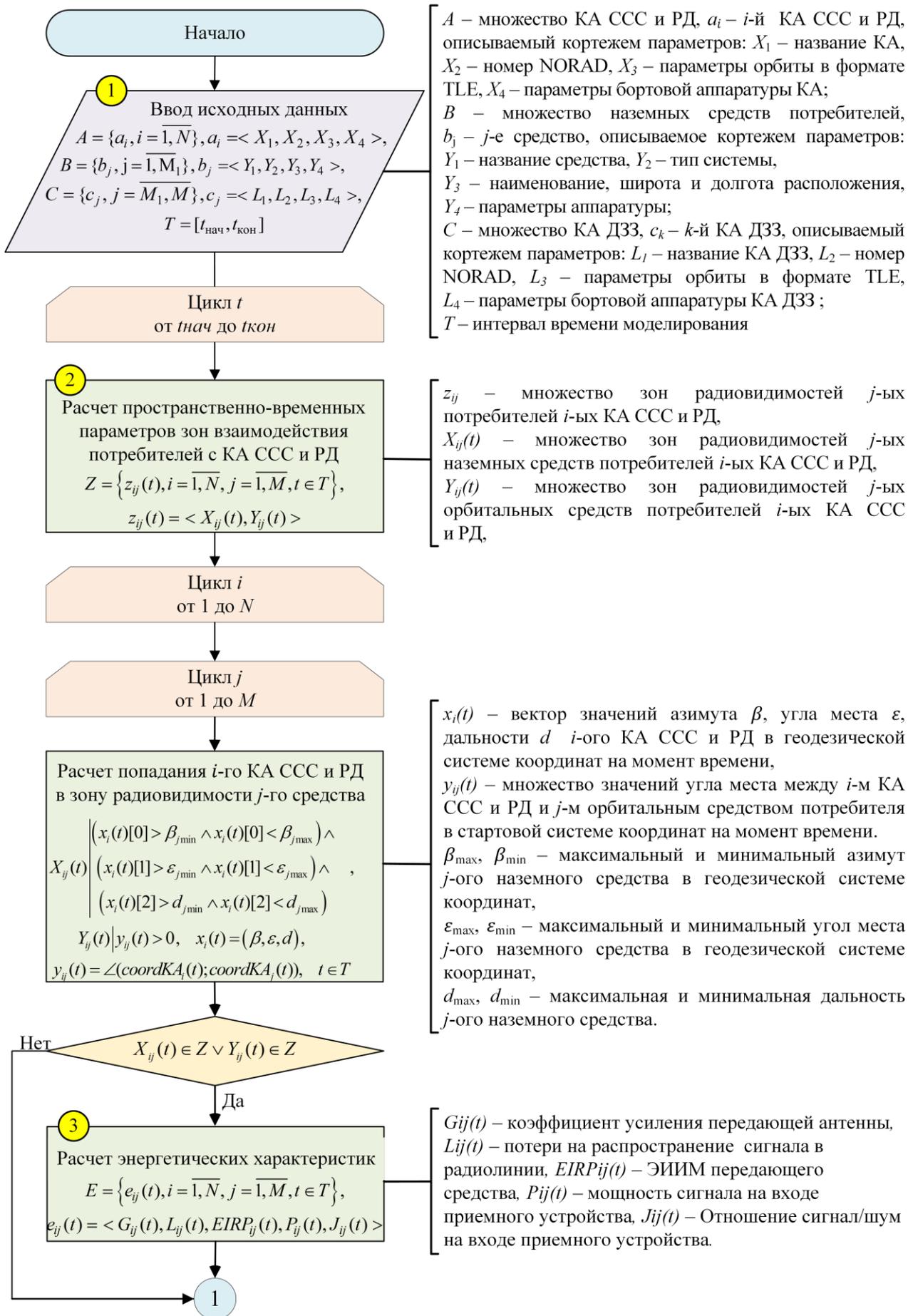


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма (а)

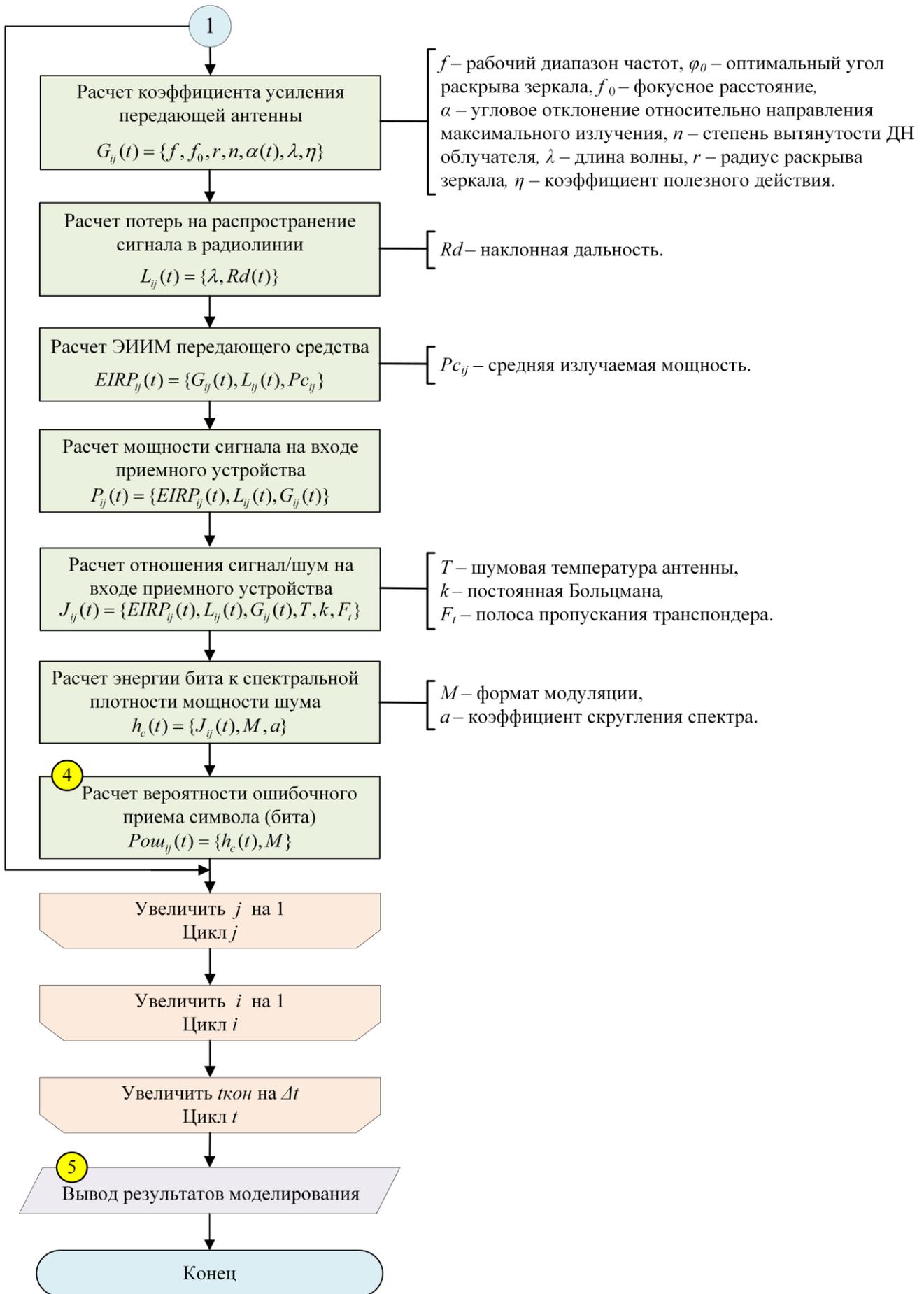


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма (б)

– параметров орбитальных РЭС (ОРЭС):

$$C = \{c_j, j = \overline{M_1, M}\}, c_j = \langle L_1, L_2, L_3, L_4 \rangle,$$

где: L_1 – название КА ДЗЗ,

L_2 – номер NORAD,

L_3 – параметры орбиты в формате TLE,

L_4 – параметры бортовой аппаратуры КА ДЗЗ.

– параметров КА ССС и РД:

$$A = \{a_i, i = \overline{1, N}\}, a_i = \langle X_1, X_2, X_3, X_4 \rangle,$$

где: X_1 – название КА ДЗЗ,

X_2 – номер NORAD,

X_3 – параметры орбиты в формате TLE,

X_4 – параметры бортовой аппаратуры КА ДЗЗ.

– временного интервала моделирования $T = [t_{\text{нач}}, t_{\text{кон}}]$.

Параметры, определяющие орбитальное положение КА, взяты из каталога NORAD в формате tle [10-11].

На 2 шаге производится расчет пространственно-временных характеристик взаимодействий передающих РЭС и КА ССС и РД [12]. В результате проведенных расчетов составляется множество зон радиовидимости (ЗРВ) передающих РЭС приемных средств КА ССС и РД. Каждый интервал радиовидимости потребителей задается следующим набором параметров:

$$Z = \{z_{ij}(t), i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}, t \in T\},$$
$$z_{ij}(t) = \langle X_{ij}(t), Y_{ij}(t) \rangle, X_{ij}(t) \subset Y_{ij}(t), X_{ij}(t) = \langle i, j, t_{\text{вх}}, t_{\text{вых}} \rangle,$$

где: z_{ij} – множество ЗРВ j -х потребителей i -х КА ССС и РД,

$X_{ij}(t)$ – множество ЗРВ j -х НРЭС i -х КА ССС и РД,

$Y_{ij}(t)$ – множество ЗРВ j -х ОРЭС i -х КА ССС и РД,

i – номер наземного или орбитального РЭС,

j – номер КА СС и РД,

$t_{вх}$ – время входа потребителя в зону радиовидимости КА ССС и РД,

$t_{вых}$ – время выхода потребителя из зоны радиовидимости КА ССС и РД.

На 3 шаге проводится расчет энергетических характеристик радиолиний (коэффициент усиления, коэффициент направленного действия, диаграмма направленности антенны (ДНА), эффективная изотропно излучаемая мощность, потери в пространстве и другие).

При расчете коэффициента усиления антенны учитываются вид антенной системы и ее размеры. В данной статье в качестве устройства излучения и приема радиоволн принята зеркальная параболическая антенна (ЗПА). Значение ДНА ЗПА облучателя по мощности в пределах главного лепестка рассчитывается по аппроксимирующей функции [13, 17, 19]:

$$f1(\Theta) = \begin{cases} \cos(\Theta)^n & \text{if } \Theta \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & \Theta > \frac{\pi}{2} \end{cases},$$

где: Θ – азимут,

n – степень вытянутости диаграммы направленности облучателя.

Расчет коэффициента использования поверхности (КИП) передающей антенны рассчитывается по формуле [13, 17, 19]:

$$g_1 = \cot\left(\frac{\varphi_0}{2}\right)^2 \left(\int_0^{\varphi_0} \sqrt{2(2n+1)} \frac{f_1(\Theta)}{f_1(0)} \tan\left(\frac{\Theta}{2}\right) d\Theta \right)^2,$$

где: φ_0 – оптимальный угол раскрыва зеркала.

Коэффициент направленного действия (КНД) передающей ЗПА вычисляется через отношение КИП и КНД антенны при полном использовании площади раскрыва, то есть при постоянстве фаз и амплитуд [13, 17, 19]:

$$D_0 = g_1 \left(\frac{2\pi r}{\lambda} \right)^2,$$

где: r – радиус раскрыва зеркала,

λ – длина волны.

Расчет ДН ЗПА осуществляется с учетом углового отклонения β относительно направления максимума излучения [13, 17, 19]:

$$d(\beta) = 4D_0 \left[\frac{J_1\left(\frac{2\pi r}{\lambda} \sin(\beta)\right)}{\frac{2\pi r}{\lambda} \sin(\beta)} \right]^2,$$

где: J_1 – функции Бесселя первого порядка.

Тогда коэффициент усиления (КУ) антенны с учетом пространственного положения приемных и передающих средств ССС равен [13, 17, 19]:

$$G = \eta \cdot d(\beta),$$

где: η – коэффициент полезного действия ЗПА.

Потери на распространение сигнала в радиолинии рассчитываются по следующей формуле [13, 17, 19]:

$$L = \left(\frac{\lambda \cdot 10^{-3}}{4\pi R_d} \right)^2,$$

где: R_d – наклонная дальность от КА ССС и РД до потребителя.

Эффективная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) средства выражается как сумма средней излучаемой мощности P_c и КУ антенны [13, 17, 19]:

$$EIRP = P_c + G_{прд}.$$

При расчете ЭИИМ передающего устройства должны быть учтены ослабления радиоволн в различных диапазонах частот.

Мощность сигнала на входе приемной антенны определяется как сумма ЭИИМ, КУ приемной антенны и потерь на распространение сигнала в радиолинии [13, 17, 19]:

$$P_c = EIRP + L + G_{прм}.$$

Расчет отношения сигнал/шум на входе КА ССС и РД осуществляется по формуле [13, 17, 19] с учетом выражения (1):

$$J = P_\Sigma - k - F_t - T,$$

где: k – постоянная Больцмана,

F_t – ширина полосы частот,

T – шумовая температура.

При расчете отношения сигнал/шум должны быть учтены значения шумовой температуры антенной системы. Значение шумовой температуры антенной системы определяется на основе анализа технической документации.

На 4 шаге проводится расчет вероятности битовой ошибки (ВБО). Для многопозиционного фазоманипулированного радиосигнала с белым шумом используется выражение [17-20]:

$$P_{ош}(h_c) = 1 - \sqrt{\frac{1}{M} + \frac{1}{2} F \left[\sqrt{2} h_c \sin \left(\frac{\pi}{M} \right) \right] + 2V \left[\sqrt{2} h_c \sin \left(\frac{\pi}{M} \right), \sqrt{2} h_c \cos \left(\frac{\pi}{M} \right) \right]},$$

где: $F(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ – формула Крампа,

$V(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^x \int_0^y \exp\left(-\frac{t^2 + u^2}{2}\right) dt du$ – табулированная функция Николсона.

Отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума [13, 17, 19]:

$$h_c = \sqrt{10^{\frac{J - 10 \log\left(\frac{\log(M, 2)}{1+a}\right)}{10}}},$$

где: a – коэффициент скругления спектра,

M – формат модуляции.

На 5 шаге определяется возможность обеспечения требуемого качества связи по рассчитанной ВБО на заданном временном интервале при имеющихся технических ограничениях в различных условиях электромагнитной обстановки.

Программная реализация математической модели радиоканала ССС и РД

На основе предложенной математической модели разработана компьютерная модель радиоканала ССС и РД при многопозиционной передаче сигнала с использованием фреймворка Qt на языке программирования C++. Интерфейс компьютерной модели (рисунок 3) содержит экранные формы ввода исходных данных, выбора информационно-расчетных задач моделирования, отображения

результатов моделирования и графического отображения процесса функционирования ССС и РД.

При формировании исходных данных предусмотрена возможность добавления новых объектов в базу данных, редактирования параметров аппаратуры и пространственного расположения. Реализован фильтр данных по различным критериям, позволяющий быстро и легко найти необходимые объекты в списке.

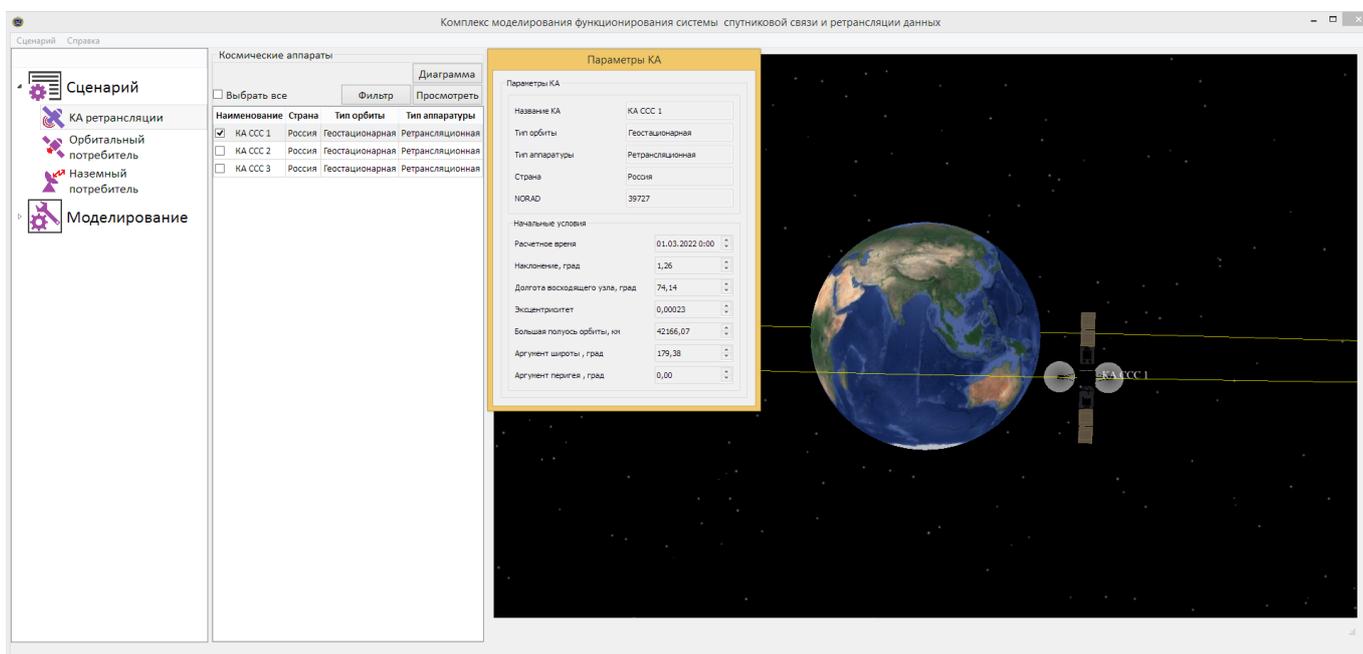


Рисунок 3 – Интерфейс компьютерной модели радиоканала ССС и РД

Моделирование осуществляется по заданным условиям в соответствии с выбранными задачами моделирования и исходными данными. При выполнении расчетов производится информирование пользователя о степени завершенности вычислений решаемой задачи. Результаты моделирования представлены в интуитивно понятном виде с использованием диаграмм (рисунок 4) и таблиц (рисунок 5). График ДНА представлен в полярной системе координат с отображением значения ширины главного лепестка ДНА. Рассчитанные

энергетические характеристики РЭС представлены в абсолютных и относительных логарифмических единицах.

Компьютерная модель содержит визуальный модуль отображения процесса функционирования ССС и РД, позволяющий представить всю иерархическую структуру объектов, используемых при решении задач моделирования (рисунок 6).

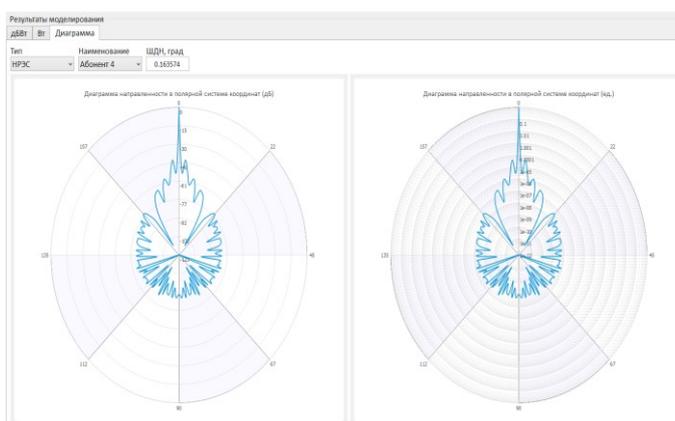


Рисунок 4 – График ДНА в полярной системе координат

№	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	Время	ВНИМ НРЭС	ВНИМ ОРЭС	КУ НРЭС	Потери НРЭС - КА ССС	Потери ОРЭС - КА ССС	Мощность сигнала (НРЭС) дБм	Мощность сигнала (ОРЭС) дБм	Сигнал/шум (НРЭС) дБм	Сигнал/шум (ОРЭС) дБм	ВВО НРЭС	ВВО ОРЭС
1	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:48:30	88.7784	87.1948	19.8968	-209.579	-209.445	-97.8931	-84.8136	14.7962	27.8787	7.0400e-06	4.68236e-15
2	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:49:40	88.7784	87.1948	19.8968	-209.579	-209.456	-97.8931	-84.8211	14.7962	27.8673	7.0392e-06	5.10703e-15
3	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:48:50	88.7784	87.1948	19.8968	-209.579	-209.468	-97.8931	-84.8136	27.8558	7.0392e-06	4.68236e-15	
4	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:50:00	88.7784	87.1948	21.5341	-209.579	-209.48	-96.2558	-84.8011	16.4335	27.8442	7.8802e-06	5.77316e-15
5	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:50:10	88.7784	87.1948	21.5341	-209.579	-209.491	-96.2558	-84.8017	16.4335	27.8328	7.88e-06	5.30676e-15
6	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:50:20	88.7784	87.1948	21.5341	-209.579	-209.503	-96.2558	-84.8084	16.4336	27.8211	7.8797e-06	4.93292e-15
7	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:50:30	88.7784	87.1948	21.5341	-209.579	-209.514	-96.2558	-84.8002	16.4336	27.8093	7.8795e-06	4.53623e-15
8	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:50:40	88.7784	87.1948	23.6736	-209.579	-209.526	-94.1163	-84.8018	18.5731	27.7975	9.86677e-12	5.65032e-15
9	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:50:50	88.7784	87.1948	23.6736	-209.579	-209.538	-94.1163	-84.8036	18.5731	27.7858	9.86677e-12	4.66294e-15
10	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:51:00	88.7784	87.1948	23.6736	-209.579	-209.55	-94.1163	-84.9154	18.5731	27.7739	9.86611e-12	6.77236e-15
11	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:51:10	88.7784	87.1948	23.6736	-209.579	-209.562	-94.1163	-84.9273	18.5731	27.7621	9.8646e-12	1.86979e-15
12	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:51:20	88.7784	87.1948	23.6736	-209.579	-209.574	-94.1163	-84.9392	18.5731	27.7502	9.8627e-12	5.10703e-15
13	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:51:30	88.7784	87.1948	25.867	-209.579	-209.585	-91.6228	-84.9111	20.7605	27.7383	9.4301e-11	4.21885e-15
14	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:51:40	88.7784	87.1948	26.2093	-209.579	-209.597	-91.5806	-84.963	21.1088	27.7263	1.36557e-11	5.32907e-15
15	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:51:50	88.7784	87.1948	26.2093	-209.579	-209.609	-91.5806	-84.975	21.1088	27.7144	1.08802e-11	6.88338e-15
16	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:52:00	88.7784	87.1948	26.2093	-209.579	-209.621	-91.5806	-84.987	21.1088	27.7023	1.05581e-11	5.32907e-15
17	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:52:10	88.7784	87.1948	26.2093	-209.579	-209.633	-91.5805	-84.999	21.1088	27.6903	1.12113e-11	4.46294e-15
18	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:52:20	88.7784	87.1948	26.2093	-209.579	-209.646	-91.5805	-85.0111	21.1088	27.6783	1.04014e-11	7.77556e-15
19	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:52:30	88.7784	87.1948	26.2093	-209.579	-209.658	-91.5805	-85.0232	21.1088	27.6662	1.22014e-11	5.51112e-15
20	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:52:40	88.7784	87.1948	26.2093	-209.579	-209.67	-91.5805	-85.0353	21.1088	27.6541	1.02141e-11	5.44009e-15
21	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:52:50	88.7784	87.1948	26.2093	-209.579	-209.682	-91.5805	-85.0474	21.1088	27.6421	1.11341e-11	5.32907e-15
22	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:53:00	88.7784	87.1948	26.2093	-209.579	-209.694	-91.5805	-85.0595	21.1088	27.6299	8.69974e-11	5.21805e-15
23	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:53:10	88.7784	87.1948	26.2093	-209.579	-209.706	-91.5805	-85.0716	21.1088	27.6177	1.33091e-11	5.21805e-15
24	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:53:20	88.7784	87.1948	26.2093	-209.579	-209.718	-91.5805	-85.0838	21.1088	27.6056	1.23219e-11	5.10703e-15
25	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:53:30	88.7784	87.1948	26.2093	-209.579	-209.73	-91.5805	-85.0959	21.1088	27.5934	1.00014e-11	5.10703e-15
26	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:53:40	88.7784	87.1948	26.2093	-209.579	-209.743	-91.5805	-85.1081	21.1088	27.5812	5.84872e-11	4.39964e-15
27	КА ССС 1	НРЭС 1	ОРЭС 1	2022.03.01 07:53:50	88.7784	87.1948	24.5332	-209.579	-209.755	-93.2566	-85.1209	19.6328	27.5691	1.48484e-11	3.30676e-15

Рисунок 5 – Рассчитанные энергетические характеристики РЭС

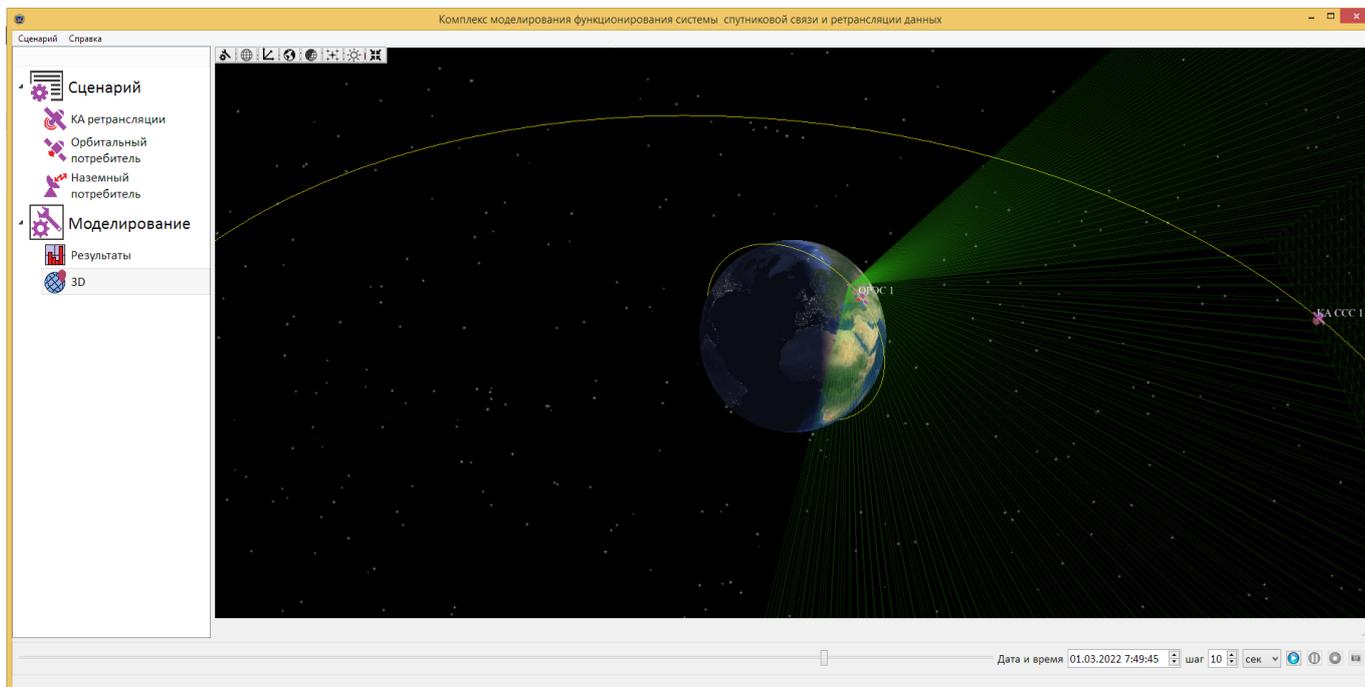


Рисунок 6 – Визуализация функционирования РЭС ССС и РД

Пример оценивания помехоустойчивости приема сигнала РЭС

Приведем пример расчета вероятности битовой ошибки для пространственно-разнесенных НРЭС, излучающих попарно коррелированные сигналы в направлении приемной антенны КА ССС и РД. Приемная антенна ориентирована на ОРЭС. Рабочий диапазон частот 18 ГГц. Исходные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные по РЭС ССС и РД

Тип РЭС	Параметры	Значение
НРЭС (53 с.ш., 50 в.д.)	Радиус раскрыва зеркала, м	3
	Степень вытянутости облучателя, ед.	2
	Мощность, Вт	900
	Азимут, град	114-248
	Угол места, град	7-90
ОРЭС (высота орбиты – 505 км., наклонение – 97°)	Радиус раскрыва зеркала, м	1
	Степень вытянутости облучателя, ед.	2
	Мощность, Вт	50
КА ССС и РД (точка стояния – 95° в.д.)	Радиус раскрыва зеркала, м	2
	Степень вытянутости облучателя, ед.	2
	Шумовая температура антенны, К	300
	Полоса пропускания транспондера, МГц	1300

Полученные результаты, представленные в таблице 2, для единичного НРЭС свидетельствуют о высокой ВБО при передаче на КА ССС радиосигнала с НРЭС, что приведет к потере информации. При моделировании нескольких пространственно-разнесенных передающих РЭС, излучающих попарно коррелированные сигналы, происходит уменьшение ВБО за счет увеличения энергетического потенциала.

Таблица 2 – Результаты моделирования

Угол отклонения β , град	Мощность сигнала НРЭС, дБВт			Мощность сигнала ОРЭС, дБВт	ВБО НРЭС			ВБО ОРЭС
	1 РЭС	2 РЭС, $r = 0$	2 РЭС, $r = 0.8$		1 РЭС	2 РЭС, $r = 0$	2 РЭС, $r = 0.8$	
2	-101,741	-98,73	-96,178	-85,282	0,002647	$4,01 \cdot 10^{-5}$	$9,09 \cdot 10^{-8}$	$3,44 \cdot 10^{-15}$
1,9	-101,744	-98,733	-96,181	-84,977	$7,66 \cdot 10^{-3}$	$4,04 \cdot 10^{-5}$	$6,15 \cdot 10^{-8}$	$6,22 \cdot 10^{-15}$
1,8	-100,298	-97,287	-94,735	-85,047	$4,97 \cdot 10^{-4}$	$1,61 \cdot 10^{-6}$	$2,09 \cdot 10^{-10}$	$4,00 \cdot 10^{-15}$
1,7	-100,297	-97,287	-94,734	-85,102	$2,96 \cdot 10^{-4}$	$1,61 \cdot 10^{-6}$	$2,06 \cdot 10^{-10}$	$6,55 \cdot 10^{-15}$
1,6	-98,666	-95,656	-93,103	-85,074	$3,55 \cdot 10^{-5}$	$9,63 \cdot 10^{-9}$	$12,60 \cdot 10^{-14}$	$5,66 \cdot 10^{-15}$
1,5	-98,687	-95,676	-93,124	-85,045	$1,69 \cdot 10^{-5}$	$1,04 \cdot 10^{-9}$	$12,55 \cdot 10^{-14}$	$4,66 \cdot 10^{-15}$
1,4	-96,861	-93,851	-91,298	-85,016	$5,03 \cdot 10^{-6}$	$2,32 \cdot 10^{-12}$	$9,66 \cdot 10^{-14}$	$6,22 \cdot 10^{-15}$
1,3	-97,048	-94,037	-91,485	-84,868	$8,48 \cdot 10^{-7}$	$6,47 \cdot 10^{-12}$	$2,08 \cdot 10^{-14}$	$6,44 \cdot 10^{-15}$
1,2	-94,908	-91,898	-89,345	-84,892	$4,58 \cdot 10^{-10}$	$9,44 \cdot 10^{-14}$	$1,15 \cdot 10^{-14}$	$6,55 \cdot 10^{-15}$
1,1	-94,907	-91,897	-89,344	-85,103	$4,55 \cdot 10^{-10}$	$1,11 \cdot 10^{-14}$	$9,21 \cdot 10^{-15}$	$6,11 \cdot 10^{-15}$
1	-92,715	-89,704	-87,152	-84,951	$1,32 \cdot 10^{-14}$	$9,44 \cdot 10^{-15}$	$5,88 \cdot 10^{-15}$	$4,22 \cdot 10^{-15}$
0,9	-92,372	-89,362	-86,809	-85,011	$1,39 \cdot 10^{-14}$	$7,77 \cdot 10^{-15}$	$6,22 \cdot 10^{-15}$	$4,77 \cdot 10^{-15}$

Анализ полученных результатов показал, что применение двух РЭС с взаимно коррелированными сигналами, в отличие от других вариантов применения, позволяет достичь требуемой ВБО менее 10^{-8} в течение продолжительности ЗРВ при угловом отклонении относительно направления максимума излучения приемной антенны КА ССС в пределах от $0,9^\circ$ до 2° . Для примера рассмотрены гармонические сигналы с *QPSK* модуляцией. При передаче двух некоррелированных сигналов мощность сигнала на входе приемной антенны увеличится на 3 дБВт относительно тех же условий, что и для одного РЭС. Применение двух сигналов с коэффициентом корреляции 0,8 позволит увеличить значение мощности сигнала на входе приемной антенны (относительно двух некоррелированных сигналов) еще на 2,5 дБВт.

Полученные результаты позволяют провести системные исследования зависимости энергетических характеристик приемного средства ССС и РД от количества маломощных передающих РЭС, излучающих попарно коррелированные сигналы.

Заключение

Разработана компьютерная модель радиоканала спутниковой связи, которая на основе модификации и интеграции известных методических подходов в предметной области позволила рассчитать вероятность битовой ошибки для пространственно-разнесенных передающих РЭС, излучающих попарно коррелированные сигналы в направлении одной приемной антенны КА ССС и РД.

Практическая значимость компьютерной модели радиоканала спутниковой связи определяется возможностью ее использования:

- для обоснования ТТТ к перспективной ССС и РД,
- для оценки эффективности функционирования ССС и РД в сложной электромагнитной обстановке,
- для обоснования направлений модернизации ССС и РД.

Список источников

1. Звонарев В.В., Мороз А.В., Шерстюк А.В. Методика оценивания характеристик диаграммы направленности ультразвукового локатора в режиме синтезирования апертуры антенны // Труды МАИ. 2019. № 106. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=105683>
2. Цветков В.А., Кондратьева С.Г. Оптимизация широкополосной фазированной антенной решётки с вибраторными излучателями // Труды МАИ. 2019. № 108. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=109430>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-6](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-6)
3. Звонарев В.В., Попов А.С., Пименов В.Ф. Методика оценивания эффективности приема взаимно коррелированных или синфазных сигналов при разнесенной передаче // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 12. С. 38–43. DOI: [10.21778/2218-5453-2020-12-38-43](https://doi.org/10.21778/2218-5453-2020-12-38-43)
4. Борисов В.И., Зинчук В.М. Помехозащищенность систем радиосвязи. Вероятностно-временной подход. - М.: РадиоСофт, 2008. – 260 с.
5. Зубарев А.Е., Позов А.В., Приходько А.И. Анализ методов расчета битовой вероятности ошибки при когерентном приеме сигналов с M-ичной фазовой

манипуляцией // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 1 (79). С. 53–59. DOI: [10.23670/IRJ.2019.79.1.009](https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.79.1.009)

6. Волхонская Е.В., Коротей Е.В., Власова К.В., Рушко М.В. Модельное исследование помехоустойчивости приема радиосигналов с QPSK, BPSK, 8PSK и DBPSK // Известия КГТУ. 2017. № 46. С. 165–174.

7. Бучинский Д.И., Вознюк В.В., Фомин А.В. Исследование помехоустойчивости приемника сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией к воздействию помех с различной структурой // Труды Военно-космической академии им. А.Ф.Можайского. 2019. № 671. С. 120-127.

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

9. Агеев Ф.И., Вознюк В.В. Методика расчета вероятности битовой ошибки оптимального посимвольного когерентного приема двоичных сигналов при наличии в канале радиосвязи узкополосной шумовой помехи // Труды МАИ. 2022. № 124. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=167070>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-15](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-15)

10. Набор TLE для спутников. URL: <https://r4uab.ru/tle/>

11. NORAD Two-Line Element Sets Current Data Today from The Center for Space Standards & Innovation. URL: <https://www.celstrak.com/NORAD/elements/>

12. Власов С.А. Теория полета космических аппаратов. - СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2007. - 435 с.

13. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Пер. с англ. - М.: Издательский дом «Вильямс», 2007. - 1104 с.

14. WRS 18/13-R. Расчет вероятности вредных помех между космическими сетями. (Отношения С/И). URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1666985827&tld=ru&lang=ru&name>
15. Воскресенский Д.И. Расчет зеркальных антенн. - М.: Изд-во МАИ, 2005. – 30 с.
16. Кубанов В.П. Направленные свойства антенных решеток. - Самара: ПГУТИ, 2015. – 56 с.
17. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. - М.: Изд-во Советское радио, 1970. - 728 с.
18. Котельников П.Л. Теория потенциальной помехоустойчивости. - М.: Госэнергоиздат, 1956. - 152 с.
19. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. - М.: Советское радио, 1969. Кн. 1. - 752 с.
20. Звонарев В.В., Попов А.С. Методический подход к оцениванию потенциальной помехоустойчивости оптимального когерентного приёма многопозиционного фазоманипулированного радиосигнала с белым шумом // Радиотехника. 2019. № 4. С. 79-83. DOI: [10.18127/j00338486-201904-79](https://doi.org/10.18127/j00338486-201904-79)

References

1. Zvonarev V.V., Moroz A.V., Sherstyuk A.V. *Trudy MAI*, 2019, no. 106. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=105683>
2. Tsvetkov V.A., Kondrat'eva S.G. *Trudy MAI*, 2019, no. 108. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=109430>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-6](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-6)

3. Zvonarev V.V., Popov A.S., Pimenov V.F. *Voprosy radioelektroniki*, 2020, no. 12, pp. 38–43. DOI: [10.21778/2218-5453-2020-12-38-43](https://doi.org/10.21778/2218-5453-2020-12-38-43)
4. Borisov V.I., Zinchuk V.M. *Pomekhozashchishchennost' sistem radiosvyazi. Veroyatnostno-vremennoi podkhod* (Noise immunity of radio communication systems. Probabilistic-temporal approach), Moscow, RadioSoft, 2008, 260 p.
5. Zubarev A.E., Pozov A.V., Prihod'ko A.I. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*, 2019, no. 1 (79), pp. 53–59. DOI: [10.23670/IRJ.2019.79.1.009](https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.79.1.009)
6. Volkhonskaya E.V., Korotei E.V., Vlasova K.V., Rushko M.V. *Izvestiya KGTU*, 2017, no. 46, pp. 165–174.
7. Buchinskii D.I., Voznyuk V.V., Fomin A.V. *Trudy VoЕННО-kosmicheskoi akademii im. A.F.Mozhaiskogo*, 2019, no. 671, pp. 120-127.
8. Parshutkin A.V., Maslakov P.A. *Trudy SPIIRAN*, 2017, no. 4 (53), pp. 159-177.
9. Ageev F.I., Voznyuk V.V. *Trudy MAI*, 2022, no. 124. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=167070>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-15](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-15)
10. *Nabor TLE dlya sputnikov*. URL: <https://r4uab.ru/tle/>
11. NORAD *Two-Line Element Sets Current Data Today from The Center for Space Standards & Innovation*. URL: <https://www.celestrak.com/NORAD/elements/>
12. Vlasov S.A. *Teoriya poleta kosmicheskikh apparatov* (Theory of spacecraft motion), Saint Petersburg, VKA imeni A.F. Mozhaiskogo, 2007, 435 p.
13. Sklyar B. *Tsifrovaya svyaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie* (Digital communication. Theoretical foundations and practical application), Moscow, Izdatel'skii dom «Vil'yams», 2007, 1104 p.

14. WRS 18/13-R. *Raschet veroyatnosti vrednykh pomekh mezhdru kosmicheskimi setyami.* (Otnosheniya C/I). URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1666985827&tld=ru&lang=ru&name>
15. Voskresenskii D.I. *Raschet zerkal'nykh antenn* (Calculation of mirror antennas), Moscow, Izd-vo MAI, 2005, 30 p.
16. Kubanov V.P. *Napravlennyye svoystva antenykh reshetok* (Directional properties of antenna arrays), Samara, PGUTI, 2015, 56 p.
17. Fink L.M. *Teoriya peredachi diskretnykh soobshchenii* (Theory of transmission of discrete messages), Moscow, Izd-vo Sovetskoe radio, 1970, 728 p.
18. Kotel'nikov P.L. *Teoriya potentsial'noi pomekhustoichivosti* (Theory of potential noise immunity), Moscow, Gosenergoizdat, 1956, 152 p.
19. Levin B.R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoi radiotekhniki* (Theoretical Foundations of Statistical Radio Engineering), Moscow, Sovetskoe radio, 1969. Vol. 1. 752 p.
20. Zvonarev V.V., Popov A.S. *Radiotekhnika*, 2019, no. 4, pp. 79-83. DOI: [10.18127/j00338486-201904-79](https://doi.org/10.18127/j00338486-201904-79)

Статья поступила в редакцию 19.10.2022

Статья после доработки 21.10.2022

Одобрена после рецензирования 29.10.2022

Принята к публикации 26.12.2022

The article was submitted on 19.10.2022; approved after reviewing on 29.10.2022; accepted for publication on 26.12.2022