

МОДЕЛЬ РАДИОЛИНИИ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ С ПАРЦИАЛЬНЫМИ КАНАЛАМИ

Драгунов М.Ю.¹

DOI:10.24682/3034-4050-2024-3-26-32

Ключевые слова: спутниковая радиолиния, ретранслятор связи, земная станция, прямая ретрансляция сигналов, радиолиния спутниковой связи, парциальный канал, частотный ресурс, баланс мощностей.

Цель исследования: разработать модель радиолинии спутниковой связи, работающей несколькими парциальными каналами в стволе с прямой ретрансляцией для нужд военных потребителей.

Метод исследования: сводится к определению энергетических параметров радиолинии спутниковой связи с парциальными каналами с учетом требований к скорости передачи и качеству канала связи. При решении научной задачи использовался метод энергетического расчета линии спутниковой связи в режиме прямой ретрансляции.

Результат: предложена модель радиолинии спутниковой связи в стволе с прямой ретрансляцией при работе земными станциями с парциальными каналами. В отличие от существующих моделей, где радиолиния спутниковой связи представлена одним каналом с фиксированным диапазоном частот в стволе спутникового ретранслятора связи, в предлагаемой модели количество каналов (парциальных) изменяется в зависимости от исходных данных для моделирования радиолинии спутниковой связи, а также в работе усилителя мощности земной станции в многосигнальном режиме, сохраняя баланс мощностей на его выходе. Модель радиолинии позволяет получить основные энергетические параметры системы, оценить качество связи в различных условиях. Это позволяет ставить и решать задачи оптимизации распределения частотного ресурса спутникового ретранслятора связи по критерию максимума пропускной способности при выполнении требований к достоверности передачи информации и готовности направления спутниковой связи, что, в свою очередь, повышает скорость передачи радиолинии спутниковой связи.

Практическая ценность: предлагаемая модель радиолинии спутниковой связи позволяет повысить скорость передачи данных за счет подбора частотных полос для парциальных каналов и гибкой настройки параметров каждого парциального канала в зависимости от требований к качеству связи, доступного ресурса и помеховой обстановки.

Введение

Спутниковая связь играет важную роль в современных телекоммуникационных системах, обеспечивая глобальное покрытие и высокую пропускную способность. Так, вооруженные конфликты последних десятилетий и специальная военная операция, проводимая Российской Федерацией, определили ключевую роль спутниковой связи при организации связи в тактическом звене управления.

В настоящее время основную часть потребностей всех видов и родов Вооруженных сил Российской Федерации (ВС РФ) в спутниковой связи обеспечивает ЕССС-2. В данной системе эксплуатируется и продолжает модернизироваться многочисленный парк станций спутниковой связи как общего применения, так и специализированных станций для всех видов и родов войск, а также для специальных объектов ВС.

Продолжает развиваться система нового поколения ЕССС-3, в составе орбитальной группировки и земных станций, которая по своим возможностям соответствует современным требованиям по управлению войсками [1, 2, 3].

В работе [4] предложена методика распределения частот спутникового ретранслятора связи при работе земными станциями (ЗС) с парциальными каналами (ПК), суть которой заключается в перераспределении диапазона частот ретранслятора связи (РС), выделенного для работы одной станции на несколько меньших диапазонов, которые подбираются из числа незанятых частот всего ствола РС. Таким образом, предлагается распределить незанятый частотный ресурс РС для работы ЗС с ПК.

Для силовых структур станция с ПК удобна, т.к. позволяет повысить коэффициент использо-

¹Драгунов Михаил Юрьевич, адъюнкт кафедры военных систем космической, радиорелейной, тропосферной связи и навигации Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E mail: dragunov1992@mail.ru

вания ствола РС, разведзащищенность радиолоний за счет распределения трактов передачи и приема по всей частотной полосе ствола ретранслятора, а также адаптивно менять частоты ПК при воздействии помехи.

Недостатками ЗС с ПК являются: усложнение аппаратуры, которое устраняется использованием цифровой обработки сигналов; усложнение процесса установления

и ведения связи, которое должно минимизироваться путем автоматизации указанных процессов; необходимостью реализации в ЗС с ПК подсистемы мониторинга наличия сигналов и помех в стволе ретранслятора.

Постановка задачи на моделирование спутниковой радиолонии с несколькими парциальными каналами

Эффективное моделирование радиолонии является ключевым этапом

в проектировании и оптимизации спутниковых систем связи. Модель спутниковой радиолонии с ПК включает в себя несколько основных элементов (рис. 1):

1. передающий тракт ЗС для формирования и излучения радиосигналов нескольких ПК;
2. среда распространения радиосигнала;
3. спутник — ретранслятор;
4. приемный тракт ЗС для приема и обработки нескольких ПК.

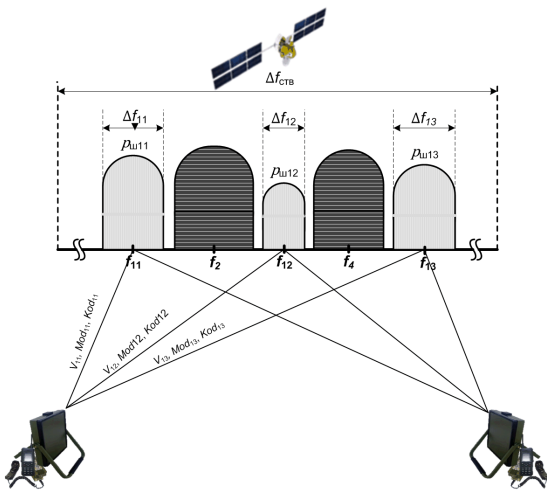


Рис. 1. Схема спутниковой радиолонии с несколькими парциальными каналами

Согласно логике работы ЗС с ПК каждое направление спутниковой связи реализуется несколькими ПК, каждый из которых имеет свой набор параметров ($V_{i,j}, f_{i,j}, P_{i,j}, Mod_{i,j}, Kod_{i,j}$) где i — номер ЗС ($i=1...N$), j — номер ПК ($j=1...N$).

Q_i): Q_i — количество ПК i -й ЗС; $V_{i,j}$ входная абонентская скорость передачи ПК; $f_{i,j}$ — частота несущей радиосигнала; $P_{i,j}$ — мощность радиосигнала; $Mod_{i,j}$ — модуляция радиосигнала; $Kod_{i,j}$ — вид и параметры помехоустойчивого кодирования [4].

Радиолония спутниковой связи с несколькими ПК работает на свободных участках частотного диапазона ствола РС — $\Delta f_{11}, \Delta f_{12}, \Delta f_{13}$ (рис. 1). Скорость передачи в радиолонии спутниковой связи распределяется между ПК, причем скорости в каждом из ПК не зависят друг от друга:

$$V_i = \sum_{j=1}^{Q_i} V_{i,j} \quad (1)$$

Таким образом, модель радиолонии при работе ЗС с ПК должна позволить определить уровень сигнала $P_{пер\ ЗС}$ на выходе передатчика ЗС и его распределение по ПК, достаточное для обеспечения связи с требуемым качеством, определяемым вероятностью битовой ошибки на выходе каждого ПК.

Модель радиолонии спутниковой связи при работе земными станциями с парциальными каналами

Целью моделирования является определение основных энергетических параметров радиолонии с ПК [5, 6, 7]. Энергетический расчет линии спутниковой связи с ПК в режиме прямой ретрансляции сигнала проводится по методике, представленной в [7].

Уровень сигнала передающей ЗС на входе ствола РС определяется основным уравнением радиосвязи:

$$P_{пр\ РС} [дБ] = P_{пер\ ЗС} - \eta_{пер\ ЗС} + G_{пер\ ЗС} + G_{пр\ РС} - \eta_{пр\ РС} - L_{\Sigma 1}, \quad (2)$$

где $P_{пер\ ЗС}$ — мощность передатчика ЗС; $\eta_{пер\ ЗС}$ — затухание сигнала в передающем фидерном тракте ЗС; $G_{пер\ ЗС}$ — коэффициент усиления антенны ЗС на передачу; $G_{пр\ РС}$ — коэффициент усиления антенны РС на прием; $\eta_{пр\ РС}$ — затухание сигнала в приемном фидерном тракте РС; $L_{\Sigma 1}$ — суммарное затухание сигнала на участке земля-борт.

Кроме сигнала передающей ЗС на входе приемника РС присутствуют сигналы других ЗС и шумы: внутренний (собственный) шум приемного тракта РС, который пересчитывается к его входу; шумы антенны РС, которые включают: космический шум, шум атмосферы с гидрометеорами; шум земли; шум атмосферы, отраженный от зем-

ли; собственный шум антенны из-за омических потерь в ее элементах; шум обтекателя антенны.

Данные шумы вместе с сигналами ЗС ретранслируются с усилением и излучаются в сторону Земли, мешая приемной ЗС.

Уровни сигнала передающей ЗС и шума РС на входе приемной ЗС также определяются основным уравнением радиосвязи:

$$P_{пр\ ЗС} [дБ] = P_{пер\ РС} - \eta_{пер\ РС} + G_{пер\ РС} + G_{пр\ ЗС} - \eta_{пр\ ЗС} - L_{\Sigma 2}, \quad (3)$$

где $P_{пер\ РС}$ — мощность передатчика РС, затраченная на излучение сигнала ЗС № 1 или шума; $\eta_{пер\ РС}$ — затухание сигнала в передающем фидерном тракте РС; $G_{пер\ РС}$ — коэффициент усиления антенны РС на передачу; $G_{пр\ ЗС}$ — коэффициент усиления антенны ЗС на прием; $\eta_{пр\ ЗС}$ — затухание сигнала в приемном фидерном тракте ЗС; $L_{\Sigma 2}$ — суммарное затухание сигнала на участке борт-земля.

На входе приемной ЗС присутствуют: полезный сигнал передающей ЗС; шумы, ретранслированные РС; внутренний (собственный) шум приемного тракта приемной ЗС, который пересчитывается к его входу; шумы антенны ЗС, которые включают: космический шум, шум атмосферы с гидрометеорами; шум земли; шум атмосферы, отраженный от земли; собственный шум антенны из-за омических потерь в ее элементах; шум об-

текателя антенны.

Зная мощность сигнала приемной ЗС и суммарную мощность шумов на входе приемной ЗС, можно вычислить отношение сигнал/шум в полосе частот полезного сигнала:

$$h^2 = \frac{E_{\sigma}}{N_{ш}}, \quad (4)$$

где $E_{\sigma} = P_c T_{\sigma}$ — энергия, приходящаяся на передачу одного бита длительностью T_{σ} ; $N_{ш}$ — спектральная плотность мощности шума.

Если $h^2 \geq h^{2*}$, где h^{2*} — требуемое значение отношения сигнал-шум для заданного качества связи, то направление радиолинии спутниковой связи от передающей до приемной ЗС считается пригодным.

Аналогичным образом определяется пригодность направления радиолинии спутниковой связи в обратном направлении. Для определения требуемой мощности сигнала на выходе передатчика ЗС, необходимо проводить расчет радиолинии спутниковой связи «из конца в начало», начиная с определения h^{2*} на входе приемника ЗС, как представлено на рисунке 3, где K_P^o — коэффициент усиления мощности ствола РС.

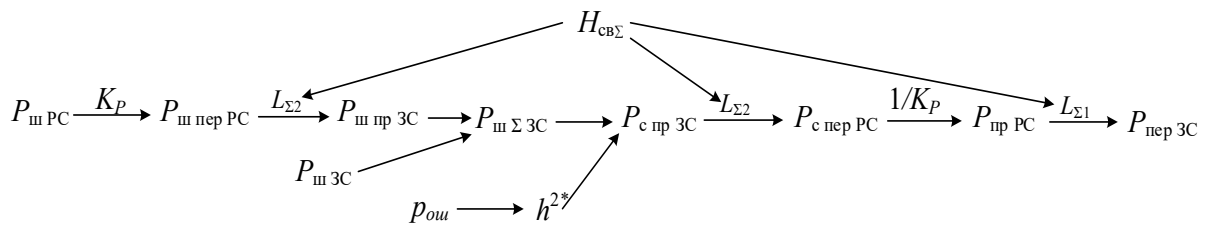


Рис.3. Последовательность определения величин при энергетическом расчете радиолинии спутниковой связи в режиме прямой ретрансляции

Итоговое выражение для определения необходимого уровня сигнала на выходе усилителя мощности ЗС с ПК:

$$\left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{Q_i} \left[\frac{E_{ЗС i} \cdot E_{РС} \cdot G_{прм\ ЗС i} \cdot G_{прм\ РС} \cdot \eta_{прм\ ЗС i} \cdot \eta_{прм\ РС}}{E_{ЗС i} \cdot G_{прм\ РС} \cdot \eta_{прм\ РС} \cdot P_{ш\ ЗС i} \cdot L_{\Sigma 2} + E_{РС} \cdot G_{прм\ ЗС ш} \cdot \eta_{прм\ ЗС i} \cdot P_{ш\ РС} \cdot L_{\Sigma 1}} \right] \quad (5)$$

где $E_{ЗС i}, E_{РС}$ — эквивалентная изотропно-излучаемая мощность i -го ПК и РС.

Требования к скорости передачи ЗС задаются системой неравенств:

$$\sum_{j=1}^{Q_i} V_{i,j} = V_i^* \quad Q_i \leq Q_i^* \quad i=1 \dots N, \quad (6)$$

где Q_i^* — максимально допустимое количество ПК i -й ЗС.

При подаче на вход УМ сигнала нескольких ПК, суммарный уровень сигнала равен:

$$P_{вх\ УМ} = \sum_{i=1}^N P_{вх\ i} \quad (7)$$

где N — количество ПК; $P_{вх\ i}$ — мощность сигнала i -го ПК на входе УМ.

Мощность сигнала на выходе УМ:

$$P_{вых\ УМ} = K \cdot P_{вх\ 1} + K \cdot P_{вх\ 2} + \dots + K \cdot P_{вх\ N} = K \cdot \sum_{i=1}^N P_{вх\ i}, \quad (8)$$

где K — коэффициент усиления.

Так как скорость передачи ПК V_i различна, то для достижения одинаковой вероятности ошибочного приема бита необходимо обеспечить разную мощность их излучения.

Зная допустимую вероятность ошибки приема бита, вид модуляции и кодирования, можно определить требуемое общее значение $h^2 = P_c/P_{ш}$ на входе демодуляторов ПК.

В i -м ПК мощность шума зависит от скорости передачи через Δf_i — полосу частот сигнала:

$$P_{ш i} = n_{ш} k T_0 \Delta f_i, \quad (9)$$

где $n_{ш}$ — коэффициент шума приемника, определяемый малошумящим усилителем, общим для всех ПК, а $k T_0 = 4 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц.

Для i -го ПК:

$$h^2 = \frac{P_i}{P_{ш i}} = \frac{P_{i+1}}{P_{ш i+1}} = \frac{P_N}{P_{ш N}}, \quad (10)$$

откуда баланс мощностей излучаемых сигналов

будет следующим:

$$\frac{P_{c i}}{P_{ш i}} = \frac{\Delta f_i}{\Delta f_{i+1}} = \frac{V_i}{V_{i+1}} \quad (11)$$

Выходная мощность i -го ПК:

$$P_{вых i} = P_{ум} \frac{P_{вх i}}{\sum_{i=1}^N P_{вх i}} = P_{ум} \frac{V_i}{\sum_{i=1}^N V_i}. \quad (12)$$

Итоговая схема модели радиолнии спутниковой связи при работе ЗС с ПК представлена на рисунке 4. Исходя из режимов работы ЗС с ПК и упрощения расчета энергетических характеристик ПК целесообразно зафиксировать некоторые параметры парциальных радиолний: модуляция — фазовая двухпозиционная (ФМ-2) или квадратурная (ФМ-4); кодирование — сверточное ($R = 1/2, K = 5$) или ($R = 3/4, K = 7$).

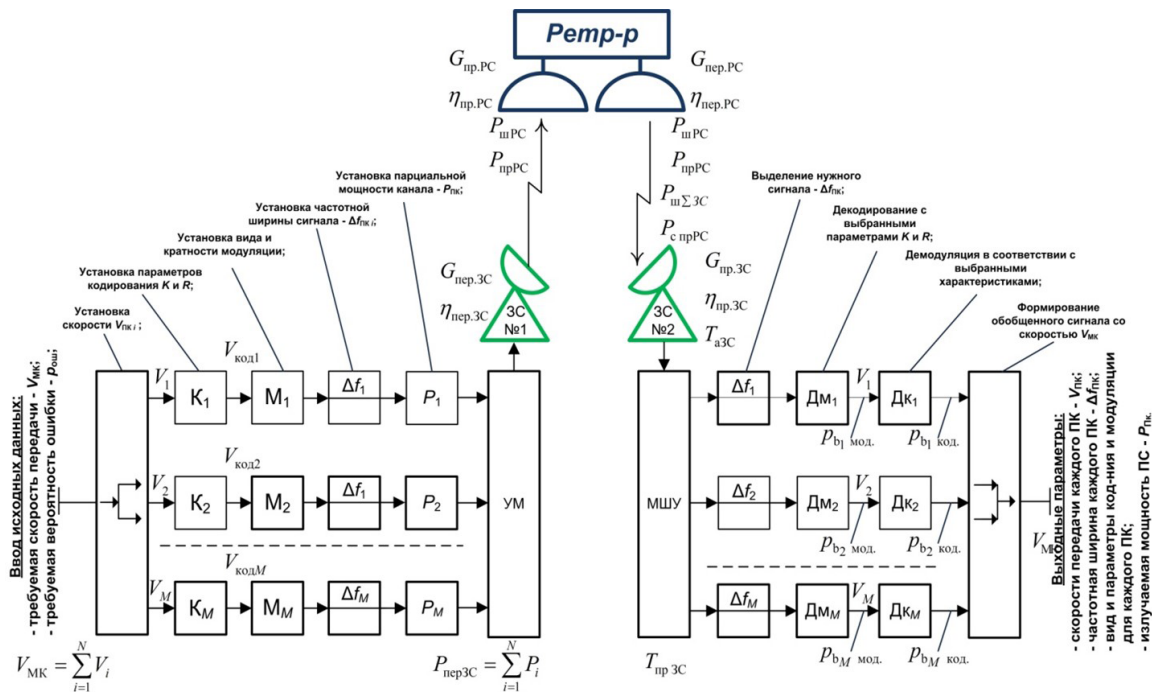


Рис.4. Модель радиолнии спутниковой связи при работе земными станциями с парциальными каналами

В данной постановке возможны два варианта расчета радиолнии с ПК:

1. при фиксированном значении суммарной скорости передачи данных (скорость магистрального канала) — $V_{МК} = \sum_{j=1}^{Q_i} V_{i,j}$
2. при фиксированном значении суммарной ширины полосы частот — $\Delta f_{\Sigma ПК}$, необходимой для работы ЗС с ПК с требуемыми параметрами.

Наибольший интерес представляет вариант с фиксированным значением $V_{МК}$, т.к. при определении необходимого для работы количества ПК нет привязки к значениям $\Delta f_{i,j}$ подбор частотных полос осуществляется в соответствии с требованиями к качеству ПК радиолнии.

Результаты расчета для первого варианта с учетом фиксированных параметров модуляции и кодирования для каждого ПК представлены в таблице 1 и на рисунках 5 и 6.

Характеристики радиолинии при работе ЗС с ПК

Характеристика СРЛ	Значение		
	1-й ПК	2-й ПК	3-й ПК
Скорость передачи данных, кбит/с	0.75	0.5	0.25
Занимаемая полоса частот, Гц	500	500	500
Вид и параметры модуляции и помехоустойчивого кодирования	ФМ-4, R=3/4, K=7	ФМ-4, R=1/2, K=5	ФМ-2, R=1/2, K=5
Вероятность битовой ошибки в канале	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵

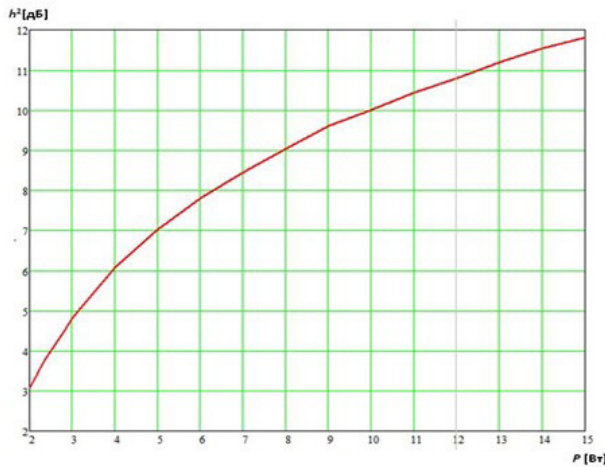


Рис.5. Зависимость отношения сигнал-шум от мощности передатчика ЗС с ПК

Оценка вероятности битовой ошибки p_b проводилась для каждого ПК, в зависимости от выбранных модуляции (13) и помехоустойчивого кодирования (14) [8, 9, 10].

$$p_{b \text{ мод.}} = \frac{\sum_{i=1}^{Q_i} p_{b_i \text{ мод.}}}{Q_i} = \frac{\sum_{i=1}^{Q_i} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi E_{b_i} \Delta f_i}{P_{ш_i}}}} \exp\left(-\frac{E_{b_i} \Delta f_i}{P_{ш_i}}\right)}{Q_i} \quad (13)$$

где $E_{b_i} / P_{ш_i}$ — отношение энергии бита к мощности шума i -го ПК; Δf_i — ширина полосы частот i -го ПК; Q_i — количество ПК.

$$p_{b \text{ код.}} = \frac{\sum_{i=1}^{Q_i} p_{b_i \text{ код.}}}{Q_i} = \frac{\sum_{i=1}^{Q_i} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi R \Delta f_i}{P_{ш_i}}}} \exp\left(-R \frac{E_{b_i} \Delta f_i}{P_{ш_i}}\right)}{Q_i} \quad (14)$$

где R — степень помехоустойчивого кодирования.

Таким образом, для достижения необходимой вероятности битовой ошибки передающая станция должна работать с мощностью передатчика равным 5 Вт.

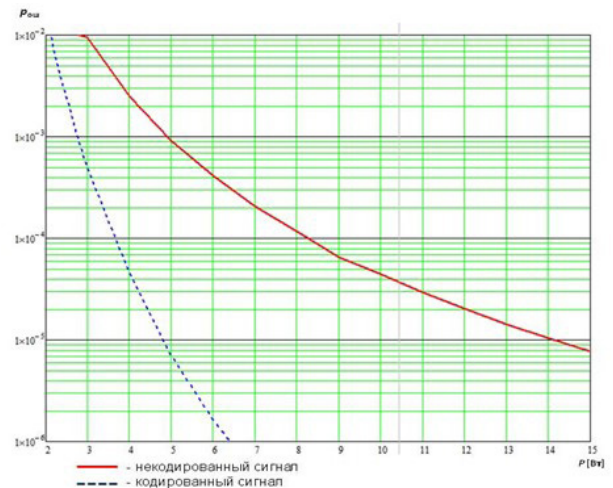


Рис.6. Зависимость вероятности битовой ошибки от мощности передатчика ЗС с ПК

Выводы

В статье рассмотрена модель радиолинии спутниковой связи специального назначения работающая ЗС с ПК, выполнена оценка качества принимаемого сигнала в различных условиях, что критически важно для обеспечения надежности систем.

Приведенная модель позволяет получить основные энергетические параметры радиолинии спутниковой связи в том числе при условии сложной шумовой обстановки, что позволяет повысить помехоустойчивость радиолинии и скорость передачи данных.

Литература

1. Стрелец В. Перспективы спутниковой связи в свете решений ВКР // Электросвязь. 2020. №2. С. 5-9.
2. Владимирова Л. Спутниковая связь на пороге больших перемен // Первая миля. 2019. № 8 (85). С. 16-19.
3. Маслаков П.А., Копалов Ю.Н. Пути развития систем спутниковой связи в условиях совершенствования телекоммуникационных технологий // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 9-10 (183-184). С. 39-46.
4. Бурлаков С. О., Драгунов М. Ю., Мишин Д. Ю., Новиков Е. А. Методика распределения частот спутникового ретранслятора для работы земных станций с парциальными каналами – СПб.: Труды военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2024. № 691. С. 26-31.
5. Жирнов А.И., Забело А.Н., Веркин С.С., Таиров Р.З., Горанько С.А., Методика расчета энергетических показателей радиолинии спутниковой связи // Вопросы науки. 2022. № 3. С. 15-20.
6. Чипига А.Ф., Щербаков В.С. Энергетический расчет спутниковой радиолинии в диапазоне метровых волн // В сборнике: Актуальные проблемы современной науки. Международная научно-практическая конференция. Северо-кавказский гуманитарно-технический институт (Россия); Словацкий университет святых Кирилла и Мефодия (Словакия); Словацкий технологический университет в Братиславе (Словакия); Северо-Кавказский федеральный университет, Институт информационных технологий и телекоммуникаций (Россия); Филиал ВНИИ МВД России по СКФО (Россия). 2013. С. 188-191.
7. Бурлаков С.О., Веркин С.С., Егрушев В.Е., Антонов В.В. Методика оценки требуемой мощности передатчика земной станции // Инновации. Наука. Образование. 2020. № 23. С. 728-734.
8. Звонарев В.В. Попов А.С. Потенциальная помехоустойчивость когерентного приема четырехпозиционного фазоманипулированного радиосигнала в присутствии когерентной гармонической помехи // Информационно — управляющие системы. 2021. №1 (110). С. 45-54.
9. Паршуткин А.В., Бучинский Д.И., Комлык Д.А. Исследование помехоустойчивости приемников сигналов с дискретной фазовой модуляцией в условиях помех с угловой модуляцией шумов // Труды МАИ. 2023. №129.
10. Агеев Ф.И., Вознюк В.В. Методика расчета вероятности битовой ошибки оптимального посимвольного когерентного приема двоичных противоположных фазоманипулированных сигналов при наличии в канале радиосвязи узкополосной шумовой помехи // Труды МАИ. 2022. № 124.

SATELLITE RADIO LINK MODEL WHEN USING EARTH STATIONS WITH PARTIAL CHANNELS

Dragunov M.Yu.¹

Keywords: *satellite radio link, communication repeater, earth station, direct relay of signals, satellite communication radio link, partial channel, frequency resource, power balance.*

The purpose of the study: *to develop a model of a satellite communication radio link operating with several partial channels in a trunk with direct relay for the needs of military users.*

Research method: *it is reduced to determining the energy parameters of a satellite radio link with partial channels, taking into account the requirements for the transmission speed and quality of the communication channel. In solving the scientific problem, the method of energy calculation of the satellite communication line in the direct relay mode was used.*

Result: *a model of a satellite communication radio link in a trunk with a direct relay is proposed when operating with earth stations with partial channels. In contrast to existing models, where a satellite communication radio link is represented by a single channel with a fixed frequency range in the trunk of a satellite communication repeater, in the proposed model the number of channels (partial) varies depending on the initial data for modeling a satellite communication radio link. as well as in the operation of the power amplifier of the earth station in multi-signal mode, maintaining the balance of power at its output. The radio link model allows you to obtain the main energy parameters of the system, to evaluate the quality of communication in various conditions. This makes it possible to set and solve the problems of optimizing the distribution of the frequency resource of the satellite repeater of communication according to the criterion of maximum bandwidth while meeting the requirements for the reliability of information transmission and the readiness of the satellite communication direction, which, in turn, increases the speed of transmission of the satellite communication radio link.*

Practical value: *the proposed model of a satellite radio link makes it possible to increase the speed of data transmission due to the selection of frequency bands for partial channels and flexible configuration of the parameters of each partial channel depending on the requirements for the quality of communication, available resource and interference environment.*

¹Mikhail Yu. Dragunov, Adjunct of the Department of Military Systems of Space, Radio Relay, Tropospheric Communication and Navigation, Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E mail: dragunov1992@mail.ru

References

1. Strelec V. Perspektivy sputnikovoj svjazi v svete reshenij VKR // Jelektrosvjaz'. 2020. №2. S. 5-9.
2. Vladimirova L. Sputnikovaja svjaz' na poroge bol'shish peremen // Pervaja milja. 2019. № 8 (85). S. 16-19.
3. Maslakov P.A., Kopalov Ju.N. Puti razvitija sistem sputnikovoj svjazi v uslovijah sovershenstvovanija telekommunikacionnyh tehnologij // Voprosy oboronnoj tehniki. Serija 16: Tehnicheskie sredstva protivodejstvija terrorizmu. 2023. № 9-10 (183-184). S. 39-46.
4. Burlakov S. O., Dragunov M. Ju., Mishin D. Ju., Novikov E. A. Metodika raspredelenija chastot sputnikovogo retransljatora dlja raboty zemnyh stancij s parcial'nymi kanalami – SPb.: Trudy voenno-kosmicheskoy akademii imeni A. F. Mozhajskogo. 2024. № 691. S. 26-31.
5. Zhirnov A.I., Zabelo A.N., Verkin S.S., Tairov R.Z., Goran'ko S.A., Metodika rascheta jenergeticheskikh pokazatelej radiolinii sputnikovoj svjazi // Voprosy nauki. 2022. № 3. S. 15-20.
6. Chipiga A.F., Shherbakov V.S. Jenergeticheskij raschet sputnikovoj radiolinii v diapazone metrovyh voln // V sbornike: Aktual'nye problemy sovremennoj nauki. Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija. Severo-kavkazskij gumanitarno-tehnicheskij institut (Rossija); Slovackij universitet svjatyh Kirilla i Mefodija (Slovakija); Slovackij tehnologicheskij universitet v Bratislave (Slovakija); Severo-Kavkazskij federal'nyj universitet, Institut informacionnyh tehnologij i telekommunikacij (Rossija); Filial VNII MVD Rossii po SKFO (Rossija). 2013. S. 188-191.
7. Burlakov S.O., Verkin S.S., Egrushev V.E., Antonov V.V. Metodika ocenki trebuemoj moshhnosti peredatchika zemnoj stancii // Innovacii. Nauka. Obrazovanie. 2020. № 23. S. 728-734.
8. Zvonarev V.V. Popov A.S. Potencial'naja pomehoustojchivost' kogerentnogo priema chetyrehpozicionnogo fazomanipulirovannogo radiosignala v prisutstvii kogerentnoj garmonicheskoy pomehi // Informacionno – upravljajushhie sistemy. 2021. №1 (110). S. 45-54.
9. Parshutkin A.V., Buchinskij D.I., Komlyk D.A. Issledovanie pomehoustojchivosti priemnikov signalov s diskretnoj fazovoj moduljaciej v uslovijah pomeh s uglovoj moduljaciej shumov // Trudy MAI. 2023. №129.
10. Ageev F.I., Voznjuk V.V. Metodika rascheta verojatnosti bitovoj oshibki optimal'nogo posimvol'nogo kogerentnogo priema dvoichnyh protivopolozhnyh fazomanipulirovannyh signalov pri nalichii v kanale radiosvjazi uzkopolosnoj shumovoj pomehi // Trudy MAI. 2022. № 124.

