

ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ РЕТРАНСЛЯТОРА СВЯЗИ ПРИ РАБОТЕ ЗЕМНЫМИ СТАНЦИЯМИ С ПАРЦИАЛЬНЫМИ КАНАЛАМИ

Бурлаков С.О.¹, Драгунов М.Ю.²

DOI:10.24682/3034-4050-2024-2-37-42

Ключевые слова: коэффициент использования частотного ресурса, спутниковая радиолиния, распределение частотного ресурса; скорость передачи канала; помехозащищенность канала; задача о заполнении рюкзака.

Аннотация

Цель: рассмотреть особенности распределения частотного ресурса ствола с прямой ретрансляцией для нужд военных потребителей.

Метод исследования: рассматриваемый вопрос сводится к решению задачи упаковки частотного ресурса ретранслятора сигналами земных станций с парциальными каналами с учетом требований к качеству канала связи и скорости передачи земных станций. При решении научной задачи использовались методы полного перебора всех подмножеств с дополнительным ограничением.

Результат: предложена методика распределения частот ретранслятора связи для работы земных станций с парциальными каналами. Методика позволяет повысить коэффициент использования ресурса ретранслятора и помехоустойчивость радиолиний спутниковой связи при дублировании передаваемой информации в парциальных каналах, а также организовывать сети спутниковой связи, используя парциальные каналы в качестве отдельных направлений связи. Отличие применяемой методики от известных заключается в распределении парциальных каналов одной земной станции по всему стволу ретранслятора связи с учетом помеховой обстановки.

Научная новизна: предлагаемая методика распределения частот ретранслятора связи дает возможность перераспределять частотный ресурс не только внутри своей сети, но и между сетями, работающими в одном стволе ретранслятора, с учетом доступного ресурса, помеховой обстановки и требований, предъявляемых к качеству связи.

Введение

В статье [1, 2] предложена земная станция (ЗС) с возможностью изменения количества трактов передачи и приема. Входной абонентский дискретный поток делится на парциальные каналы (ПК), каждый из которых обрабатывается в своем тракте. В указанной статье представлены структурные схемы трактов передачи и приема ЗС с ПК, подход к делению входного потока при передаче и объединении парциальных каналов при приеме.

Достоинством ЗС с ПК являются: увеличение коэффициента использования частотного ресурса ретранслятора, благодаря использованию его незанятых полос; возможность организовывать сети в стволе с прямой ретрансляцией без использования центральной ЗС; повышение помехозащищенности радиолиний спутниковой связи (СС) путем дублирования передаваемой информации или распределения трактов передачи и приема парциальных каналов по неподавленным частотам; повышение разведзащищенности ради-

олиний за счет распределения трактов передачи и приема по всей частотной полосе ствола.

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 распределения частотного ресурса ретранслятора

В полосе частот ствола ретранслятора $\Delta f_{\text{ств}}$ работают ЗС, между соседними сигналами которых имеются M незанятых частотных полос (рис. 1). Каждая i -я частотная полоса ($i = 1 \dots M$) характеризуется набором параметров $(f_i, \Delta f_i, p_{\text{ми}})$, где f_i — центральная частота; Δf_i — частотная ширина; $p_{\text{ми}}$ — мощность шума.

¹Бурлаков Сергей Олегович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры военных систем космической, радиорелейной, тропосферной связи и навигации Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: soburlakov@yandex.ru

²Драгунов Михаил Юрьевич, адъюнкт кафедры военных систем космической, радиорелейной, тропосферной связи и навигации Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: dragunov1992@mail.ru

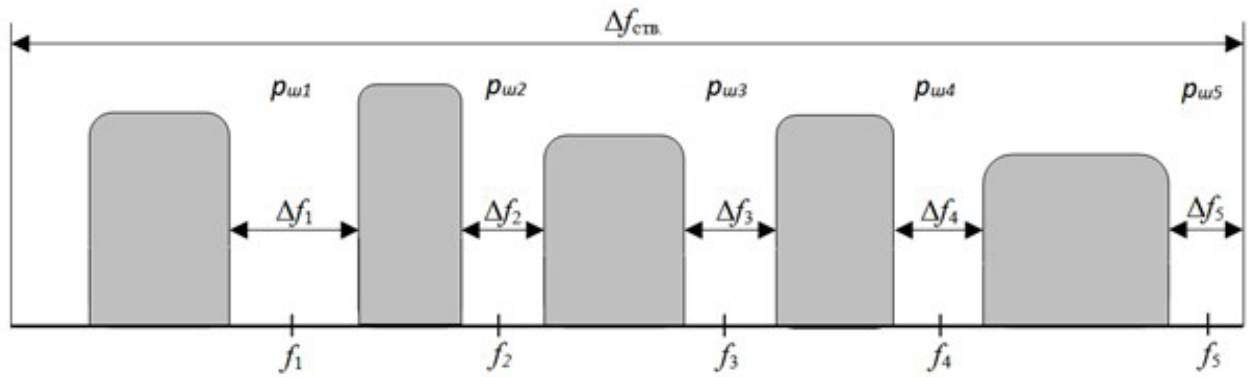


Рис. 1. Загрузка ствола ретранслятора связи

Между N ЗС с ПК требуется организовать дуплексные направления спутниковой связи (НСС). Каждая пара ЗС формирует одно НСС, в котором требуемую и реализуемую скорости передачи данных от i -й ЗС обозначим как V_i^* и

V_i соответственно. В НСС скорости передачи и приема данных могут как совпадать, так и не совпадать. Поэтому для корреспондирующих i -й и j -й ЗС возможны две ситуации: $V_i^* = V_j^*$, $V_i^* \neq V_j^*$ (рис. 2).

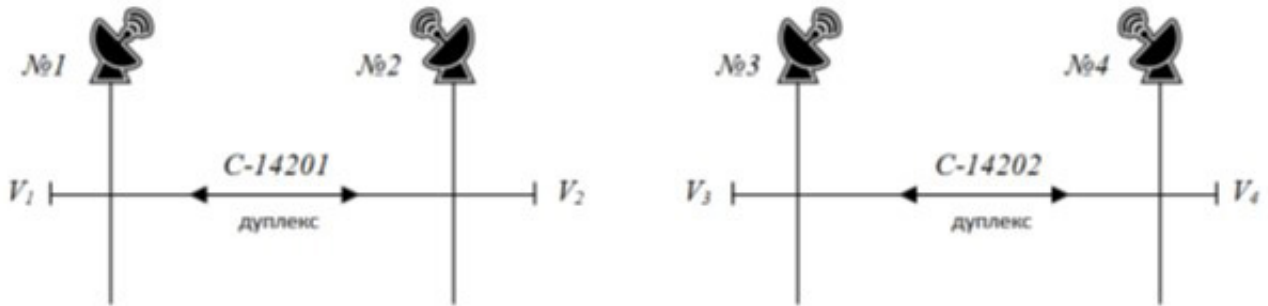


Рис. 2. Вариант схемы спутниковой связи

В соответствии с логикой работы ЗС с ПК каждое НСС реализуется несколькими парциальными каналами, каждый из которых имеет свой тракт передачи и приема (рис. 3) и характеризуется набором параметров $(V_{ij}, f_{ij}, P_{ij}, Mod_{ij}, Kod_{ij})$, где i — номер ЗС ($i = 1 \dots N$), L_i — количество парциальных каналов i -й ЗС; j — номер парциального канала ($j = 1 \dots L_i$): V_{ij} — входная абонентская скорость передачи парциального канала; f_{ij} — частота несущей радиосигнала; P_{ij} — мощность радиосигнала; Mod_{ij} — модуляция радиосигнала; Kod_{ij} — вид и параметры помехоустойчивого кодирования.

Частотный ресурс ретранслятора между ЗС с ПК должен распределяться с учетом требо-

ваний к качеству канала связи и скорости передачи ЗС.

Требования к качеству каналов связи определяются вероятностью битовой ошибки на его выходе и формализуются системой из $(N \cdot L_N)$ неравенств:

$$P_{\text{ош } ij} \geq P_{\text{ош}}^*, i=1 \dots N, j=1 \dots L_i \quad (1)$$

Требования к скорости передачи ЗС задаются системой из N неравенств:

$$\sum_{j=1}^{L_i} V_{i,j} = V_i^*, L_i \leq L_i^* \quad i=1 \dots N \quad (2)$$

где L_i^* — максимально допустимое количество парциальных каналов i -й ЗС.

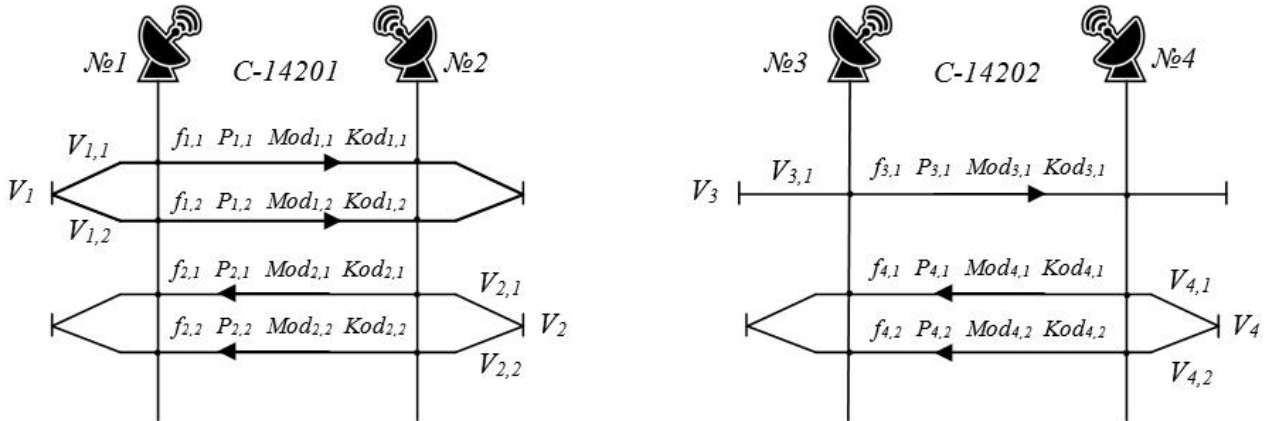


Рис. 3. Вариант реализации схемы спутниковой связи ЗС с ПК

При распределении частотного ресурса необходимо как можно плотнее упаковывать имеющийся частотный ресурс ретранслятора сигналами ЗС с ПК, что формализуется целевой функцией:

$$\left[\sum_{i=1}^M \Delta f_i - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{L_i} \Delta f_{i,j} \right] \xrightarrow{f_{i,j}, \Delta f_{i,j}} \max \quad (3)$$

Зависимости $P_{\text{ош } ij}$ и Δf_{ij} от $(V_{ij}, f_i, P_{ij}, Mod_{ij}, Kod_{ij})$ определяется известными выражениями [3].

В изложенной постановке задача имеет много переменных. Поэтому, исходя из режимов работы ЗС специального назначения, целесообразно зафиксировать некоторые параметры парциальных радиолиний: модуляция — фазовая двухпозиционная (ФМ-2); кодирование — сверточное ($R=1/2, K=5$) или ($R=3/4, K=7$), парциальная мощность на выходе усилителя зависит от распределения абонентских скоростей каналов [4]:

$$P_{\text{вых } i,j} = P_{\text{ум } i} \frac{V_{i,j}}{\sum_{j=1}^{L_i} V_{i,j}} \quad (4)$$

где $P_{\text{ум } i}$ мощность усилителя мощности i -й ЗС.

Для каждого парциального радиоканала достижение минимального значения вероятности битовой ошибки возможно за счет обеспечения максимума мощности передатчика [5, 6].

При изменении V_{ij} меняется Δf_{ij} . При этом спектральная плотность мощности излучаемого сигнала согласно (4) не меняется, что при одинаковом $p_{\text{ош } ij}$ не меняет h_{ij}^2 на входе парциального приемника. Таким образом, качество парциаль-

ного канала можно менять только выбором параметров кодирования, что, в свою очередь, также меняет Δf_{ij} .

Методика распределения частот ретранслятора связи для работы земными станциями с парциальными каналами как задача заполнения «Рюкзака»

Рассматриваемая задача сводится к решению задачи упаковки частотного ресурса ретранслятора сигналами ЗС с ПК, с учетом требований к качеству канала связи и скорости передачи ЗС, т. е. распределению $N L_i$ сигналов по M незанятым частотным полосам при условии:

$$\sum_{i=1}^M \Delta f_i \geq N \cdot L_i \cdot \Delta f_{i,j} \quad (5)$$

Одним из способов решения этой задачи является полный перебор всех подмножеств из n элементов, которых будет 2^n и выбор среди них наилучшего подмножества, удовлетворяющего условиям задачи. Для каждого значения Δf_i будет храниться информация по наилучшему его решению, т. е. наиболее выгодное заполнение частотного интервала для всех возможных $\sum_{i=1}^M \Delta f_i$.

Есть две возможности распределения сигналов по частотным полосам, используя первые i сигналов — взять его или нет. Если не брать, то в этом случае:

$$F(i, \sum_{i=1}^M \Delta f_i) = F(i-1, \sum_{i=1}^M \Delta f_i) \quad (6)$$

Если брать (при условии выполнения (5)), то останется свободная вместимость $\Delta f_i - \Delta f_{ij}$,

которую можно будет заполнить первыми $i-1$ сигналами, следовательно:

$$F(i, \sum_{j=1}^M \Delta f_j) = F(i-1, \sum_{j=1}^M \Delta f_j - \Delta f_{i,j}) \quad (7)$$

Из двух возможных вариантов нужно выбрать вариант, удовлетворяющий условию (3).

Выполняя вышеприведенный алгоритм, получится множество вариантов распределения, оценка которых осуществляется в соответствии с целевой функцией (3) [7, 8].

При планировании распределения частотного ресурса ретранслятора могут вводиться дополнительные ограничения для парциальных каналов, что повлияет на конечное распределение. В этом случае стоит рассмотреть способ решения задачи о распределении частотного ресурса с дополнительным ограничением на типы предметов, где под типом предмета понимается свойство, ограничивающее распределение парциальных каналов по M незанятым частотным полосам.

Рассмотрим свободные частотные полосы M , которые выступают в качестве «рюкзака», с ограничением b^* на возможный максимальный «вес» предметов в нём и множество предметов n . Добавим ограничение: в «рюкзаке» можно поместить только d^* типы предметов из n возможных, $d^* \leq n$. Каждый i -й тип предметов ($i = 1, 2, \dots, n$) характеризуется своими характеристиками: a_i, c_i и x_i . Требуется получить «рюкзаке» при выполнении ограничений и условия (3).

Для формализации постановки задачи введём в рассмотрение набор булевых переменных $x_i, i = 1, 2, \dots, n$: $x_i = 1$, если хотя бы один предмет i -го типа помещён в «рюкзаке», и $x_i = 0$, если ни одного предмета i -го типа в «рюкзаке» нет. Число возможных типов предметов в «рюкзаке» ограничено условием:

$$\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \leq d^*. \quad (8)$$

Необходимо максимизировать стоимость предметов в «рюкзаке»:

$$c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n \rightarrow \max, \quad (9)$$

при ограничении:

$$a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n \leq b^*. \quad (10)$$

Используя идеи динамического программирования, рассмотрим множество задач типа (8)–(10).

При $d = 1$ решается задача отыскания максимума (9) при использовании только предметов одного типа $i, 1 \leq i \leq n$, для заполнения виртуаль-

ных «рюкзаков» с максимальными суммарными весами предметов b ($0 \leq b \leq b^*$):

$$f_1(b) = \max(c_i x_i), \quad (11)$$

при ограничениях для каждого выбираемого значения x_i и b , удовлетворяющих условиям

$$a_i x_i \leq b. \quad (12)$$

Найденные значения максимумов $f_1(b)$ обозначим для дальнейшего использования как $f_1(\Delta b)$, где $\Delta b = b, 0 \leq b \leq b^*, 0 \leq \Delta b \leq b^*$. Для получения максимума (9) при наполнении «рюкзака» не более чем двумя типами предметов, т. е. при $d = 2$, будем считать, что часть вместимости «рюкзака» Δb будет выделяться для наполнения вторым типом предметов. Конкретный номер типа предмета будут определяться для каждого виртуального «рюкзака» вместимостью b из выражения:

$$f_2(b) = \max(c_i x_i + f_1(b - \Delta b)) = \max(c_i x_i) + f_1(b - \Delta b), \quad (13)$$

при ограничениях:

$$1 \leq i \leq n, 0 \leq \Delta b \leq b, 0 \leq b \leq b^*, a_i x_i \leq \Delta b. \quad (14)$$

В (13) $f_1(b - \Delta b)$ представляет собой уже найденное на первом шаге алгоритма максимальное значение стоимости «рюкзака» вместимостью $b - \Delta b$ при его наполнении экземплярами только одного типа предметов при выполнении (11) и (12). Это максимальное значение складывается со значением c_i , где тип предмета i выбирается из множества $\{1, 2, \dots, n\}$, и количество экземпляров этого типа определяется для каждой вместимости «рюкзака» Δb , где $0 \leq \Delta b \leq b$ при выполнении ограничений (14).

Для получения максимума двух слагаемых, одно из которых имеет фиксированное значение, нужно выбрать предмет типа i , который даёт максимальное значение $c_i x_i$ при вместимости виртуального «рюкзака» Δb и $a_i x_i \leq \Delta b$. На первом шаге алгоритма такое значение уже было определено и обозначено как $f_1(\Delta b)$. Следовательно, выражение (13) можно записать так:

$$f_2(b) = \max(f_1(\Delta b) + \max(c_i x_i) + f_1(b - \Delta b)), \quad (15)$$

при $0 \leq \Delta b \leq b, 0 \leq b \leq b^*$.

Продолжая процесс, получим рекуррентное уравнение относительно числа типов предметов, используемых при заполнении гипотетических «рюкзаков»:

$$f_d(b) = \max(f_1(\Delta b) + f_{d-1}(b - \Delta b)), \quad (16)$$

для всех $0 \leq \Delta b \leq b, 0 \leq b \leq b^*, d = 2, 3, \dots, d^*$ [9, 10]. Повышение помехозащищённости радиолоний СС достигается путем дублирования передаваемой информации по незанятым частотным полосам или распределения трактов передачи и

приема парциальных каналов по неподавленным частотам, что планируется в ходе выделения M частотных полос.

Выводы

В статье рассмотрена постановка задачи распределения частотного ресурса ретранслятора связи, вариант реализации схемы спутниковой связи ЗС с ПК, предложена методика распределения частот ретранслятора при работе ЗС с пар-

циальными каналами.

Приведенная методика кроме повышения коэффициента использования частотного ресурса ретранслятора, позволит повысить помехоустойчивость радиолиний в случае дублирования передаваемой информации в парциальных каналах, а также организовывать сети спутниковой связи, используя парциальные каналы в качестве отдельных направлений связи.

Литература

1. Цветков К.Ю., Бурлаков С.О., Климов И.С. Распределение частот ретранслятора связи при работе земных станций с парциальными каналами // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2020. № 672. С. 88–91.
2. Бурлаков С.О., Смирнов А.А., Цветков К.Ю. Научно-технические предложения по реализации методики распределения частотно-энергетического ресурса земных станций и бортовых радиотехнических комплексов высокоскоростных систем спутниковой связи // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2020. № 673. С. 68–78.
3. Немировский М.С., Локшин Б.А., Аронов Д.А. Основы построения систем спутниковой связи / Под ред. М.С. Немировского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2018.
4. 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.
5. Махов Д.С. Метод оптимизации энергетических параметров системы передачи информации в парциальных радиоканалах малоразмерных подвижных объектов на основе аппарата теории нечетких множеств // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 27–49.
6. Якушенко С.А., Шабуня В.В., Лукашев А.В., Егрушев В.Е., Веркин С.С., Лаута О.С., Сатдинов А.И., Селезнев А.В. Спутниковые системы передачи специального назначения / Под ред. С.А. Якушенко. – СПб.: ВАС, 2024.
7. Массобрио Р., Дорронзоро Диаз В., Несмачнов Кановас С.Е. Виртуальный Эрудит для решения задачи о рюкзаке: обучение автоматическому распределению ресурсов // Тр. Ин-та системного Программирования РАН. 2019. Т31, №2. С. 21–32.
8. Топка В.В. Многомерная задача о рюкзаке: эффективный метод решения и возможные приложения // Труды Института системного анализа Российской академии наук. 2019. Т. 69. №2. С. 54–64.
9. Офицеров В.П., Смирнов С.В. Метод решения задачи о рюкзаке с дополнительным ограничением на число типов предметов // Челябинский физико-математический журнал. 2022. Т.7. С. 267–276.
10. Савельев В.П. Задача о рюкзаке, условия оптимальности // Евразийское Научное Объединение. 2019. № 4-1 (50). С. 31–34.

INCREASING THE THROUGHPUT OF THE COMMUNICATION REPEATER WHEN WORKING WITH EARTH STATIONS WITH PARTIAL CHANNELS

Burlakov S.O.¹, Dragunov M.Yu.²

Keywords: frequency resource utilization factor, satellite radio link, frequency resource allocation; channel transmission rate; channel noise immunity; backpack filling problem.

Abstract

Objective: to consider the features of the distribution of the frequency resource of the barrel with direct relay for the needs of military consumers.

Research method: the issue under consideration is reduced to solving the problem of packing the frequency

¹Sergey O. Burlakov, Dr.Sc., Professor, Professor of the Department of Military Systems of Space, Radio Relay, Tropospheric Communication and Navigation, Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: soburlakov@yandex.ru

²Mikhail 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

resource of the repeater with signals from earth stations with partial channels, taking into account the requirements for the quality of the communication channel and the transmission rate of earth stations. In solving the scientific problem, methods of complete enumeration of all subsets with an additional limitation were used.

Result: a method for allocating communication repeater frequencies for the operation of earth stations with partial channels is proposed. The method allows to increase the coefficient of transponder resource utilization and interference immunity of satellite communication radio links when duplicating transmitted information in partial channels, as well as to organize satellite communication networks using partial channels as separate communication directions distribution of partial channels of one earth station throughout the trunk of the communication repeater, taking into account the interference situation.

Scientific novelty: the proposed method of frequency distribution of the communication repeater makes it possible to redistribute the frequency resource not only within the network, but also between the networks operating in the same trunk of the repeater, taking into account the available resource, interference situation and requirements for the quality of communication.

References

1. Cvetkov K.Ju., Burlakov S.O., Klimov I.S. Raspredelenie chastot retransljatora svjazi pri rabote zemnyh stancij s parcial'nymi kanalami // Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A. F. Mozhajskogo. 2020. № 672. S. 88–91.
2. Burlakov S.O., Smirnov A.A., Cvetkov K.Ju. Nauchno-tehnicheskie predlozhenija po realizacii metodiki raspredelenija chastotno-jenergeticheskogo resursa zemnyh stancij i bortovyh radiotehnicheskikh kompleksov vysokoskorostnyh sistem sputnikovoj svjazi // Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A. F. Mozhajskogo. 2020. № 673. S. 68–78.
3. Nemirovskij M.S., Lokshin B.A., Aronov D.A. Osnovy postroenija sistem sputnikovoj svjazi / Pod red. M.S. Nemirovskogo. – M.: Gorjachaja linija – Telekom, 2018.
4. 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.
5. Mahov D.S. Metod optimizacii jenergeticheskikh parametrov sistemy peredachi informacii v parcial'nyh radiokanalakh malorazmernyh podvizhnyh ob#ektov na osnove apparata teorii nechetkih mnozhestv // Sistemy upravlenija, svjazi i bezopasnosti. 2019. № 4. S. 27–49.
6. Jakushenko S.A., Shabunja V.V., Lukashev A.V., Egrushev V.E., Verkin S.S., Lauta O.S., Satdinov A.I., Seleznev A.V. Sputnikovye sistemy peredachi special'nogo naznachenija / Pod red. S.A. Jakushenko. – SPb.: VAS, 2024.
7. Massobrio R., Dorrnzoro Diaz V., Nesmachnov Kanovas S.E. Virtual'nyj Jerudit dlja reshenija zadachi o rjukzake: obuchenie avtomaticheskomu raspredeleniju resursov // Tr. In-ta sistemnogo Programirovanija RAN. 2019. T31, №2. S. 21–32.
8. Topka V.V. Mnogomernaja zadacha o rjukzake: jeffektivnyj metod reshenija i vozmozhnye prilozhenija // Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossijskoj akademii nauk. 2019. T. 69. №2. S. 54–64.
9. Oficerov V.P., Smirnov S.V. Metod reshenija zadachi o rjukzake s dopolnitel'nym ogranicheniem na chislo tipov predmetov // Cheljabinskij fiziko-matematicheskij zhurnal. 2022. T.7. S. 267–276.
10. Savelev V.P. Zadacha o rjukzake, uslovija optimal'nosti // Evrazijskoe Nauchnoe Ob#edinenie. 2019. № 4-1 (50). S. 31–34.

