

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПОСТРОЕНИЮ ЗЕМНОЙ СТАНЦИИ С ПАРЦИАЛЬНЫМИ КАНАЛАМИ

Драгунов М.Ю.¹

DOI:10.21681/3034-4050-2025-1-60-67

Ключевые слова: ретранслятор связи, спутниковая радиолиния, частотный ресурс, баланс мощностей, пропускная способность, коэффициент использования частотного ресурса, информационный пакет, протокол ТСР.

Цель: рассмотреть особенности построения земной станции с парциальными каналами для нужд военных потребителей.

Результат: предложен вариант построения земной станции, способной работать парциальными каналами в стволе ретранслятора связи с прямой ретрансляцией. В отличие от существующих вариантов построения земных станций, работающих в стволе с прямой ретрансляцией сигналов, где каждой земной станции выделяется частотный ресурс ствола ретранслятора связи в пределах одного диапазона, в предлагаемой земной станции используется весь частотный ресурс ствола ретранслятора, причем не происходит перестроения по частоте уже работающих земных станций, выбор диапазонов частот для парциальных каналов одной земной станции осуществляется исходя из требований, предъявляемых к качеству связи. В работе представлены структурные схемы приемника и передатчика земной станции с парциальными каналами, а также вариант реализации предлагаемой схемы земной станции.

Практическая значимость: возможность реализации способа распределения частотного ресурса ретранслятора на земных станциях при внедрении алгоритма в программное обеспечение спутниковых маршрутизаторов и его доработки для возможности автоматизированного сканирования частот ствола ретранслятора связи и организации парциальных каналов.

Введение

Спутниковая связь является одной из ключевых технологий, обеспечивающих глобальную коммуникацию и передачу данных. В условиях стремительного развития информационных технологий и увеличения объемов данных, передаваемых по всему миру, актуальность спутниковой связи возрастает.

В связи с этим встает вопрос загрузки спутниковых ретрансляторов, распределения ресурса пропускной способности ретрансляторов между всеми абонентами, т. е. необходимость качественного и количественного улучшения существующей спутниковой группировки.

В работе [1] рассматривается методика распределения ресурса пропускной способности ретранслятора связи при работе с земными станциями (ЗС) с парциальными каналами (ПК), позволяющая повысить пропускную способность спутникового ретранслятора. В соответствии с этим необходима земная станция, способная разделять информационный поток на несколько независимых парциальных радиосигналов, формировать их и одновременно излучать.

Предложения по построению земной станции с парциальными каналами

Общий принцип работы земных станций, порядок распределения ресурса пропускной способности ретранслятора связи, расположенного на космическом аппарате, представлен на рисунке 1.

Объем передаваемой информации в сети спутниковой связи зависит от качества распределения ресурса пропускной способности ретранслятора. При организации сети в стволе с прямой ретрансляцией коэффициент использования частотного ресурса ретранслятора:

$$K_f = \frac{\sum_{i=1}^{N_{ЗС}} \Delta f_i^f}{\Delta f_{\text{ств}}^f} \quad (1)$$

где Δf_i^f — полоса частот ствола ретранслятора, выделенная для сигнала

i -й земной станции; $\Delta f_{\text{ств}}^f$ — полоса пропускания ствола; $N_{ЗС}$ — количество земных станций, работающих в стволе [2].

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

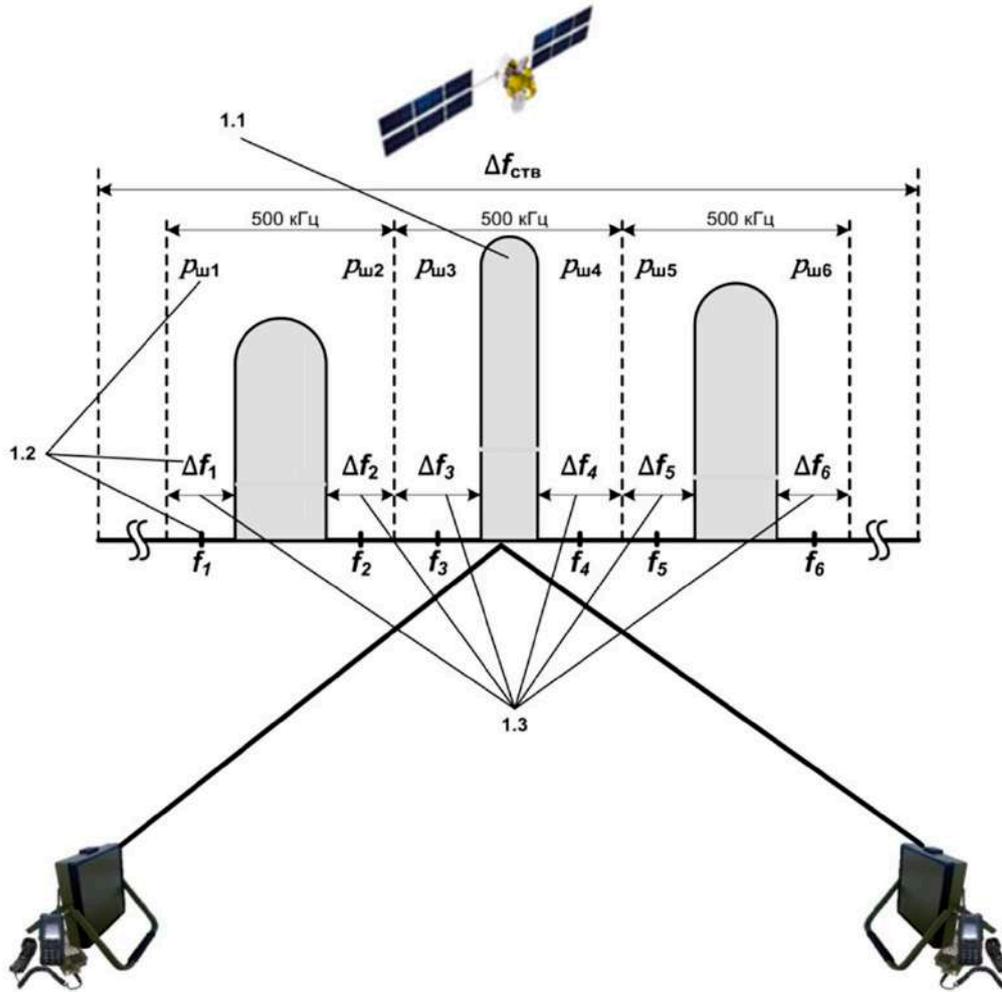


Рис. 1. Принцип работы двух земных станций в створе с прямой ретрансляцией сигналов

При заполнении створа сигналами ЗС K_f всегда меньше единицы и уменьшается с увеличением количества ЗС из-за наличия защитных интервалов между соседними по спектру частот сигналами, наличия защитных интервалов по краям створа на эффект Доплера, особой расстановки частот, уменьшающей взаимные помехи, и т. д.

В полосе частот створа ретранслятора $\Delta f_{ств}$ работают ЗС, между соседними сигналами которых имеются M незанятых частотных полос 1.3 (рис. 1). Каждая i -я частотная полоса ($i = 1 \dots M$) характеризуется набором параметров: f_i , Δf_i , $p_{шi}$ (1.2 на рис. 1), где f_i — центральная частота; Δf_i — частотная ширина; $p_{шi}$ — мощность шума.

Пара ЗС работают в одном направлении

спутниковой связи (НСС), в одной выделенной для работы НСС полосе частот 1.1 (рис.1). При данном подходе остаются свободными M частотных полос, уменьшающих значение K_f створа.

Для реализации методики, описанной в [1], необходима ЗС, способная разделять входящий абонентский поток со скоростью передачи V [бит/с] на M парциальных потоков со скоростями передачи V_i , $i = 1 \dots M$, формировать и одновременно излучать парциальные радиосигналы в полосах Δf_i (Δf_3 , Δf_4 , Δf_5 на рис. 2) на несущих частотах f_i (f_3 , f_4 , f_5 на рис. 2). Количество парциальных потоков M определяют каждый раз путем анализа количества свободных частотных полос створа, их ширины Δf_i и центральных частот f_i .

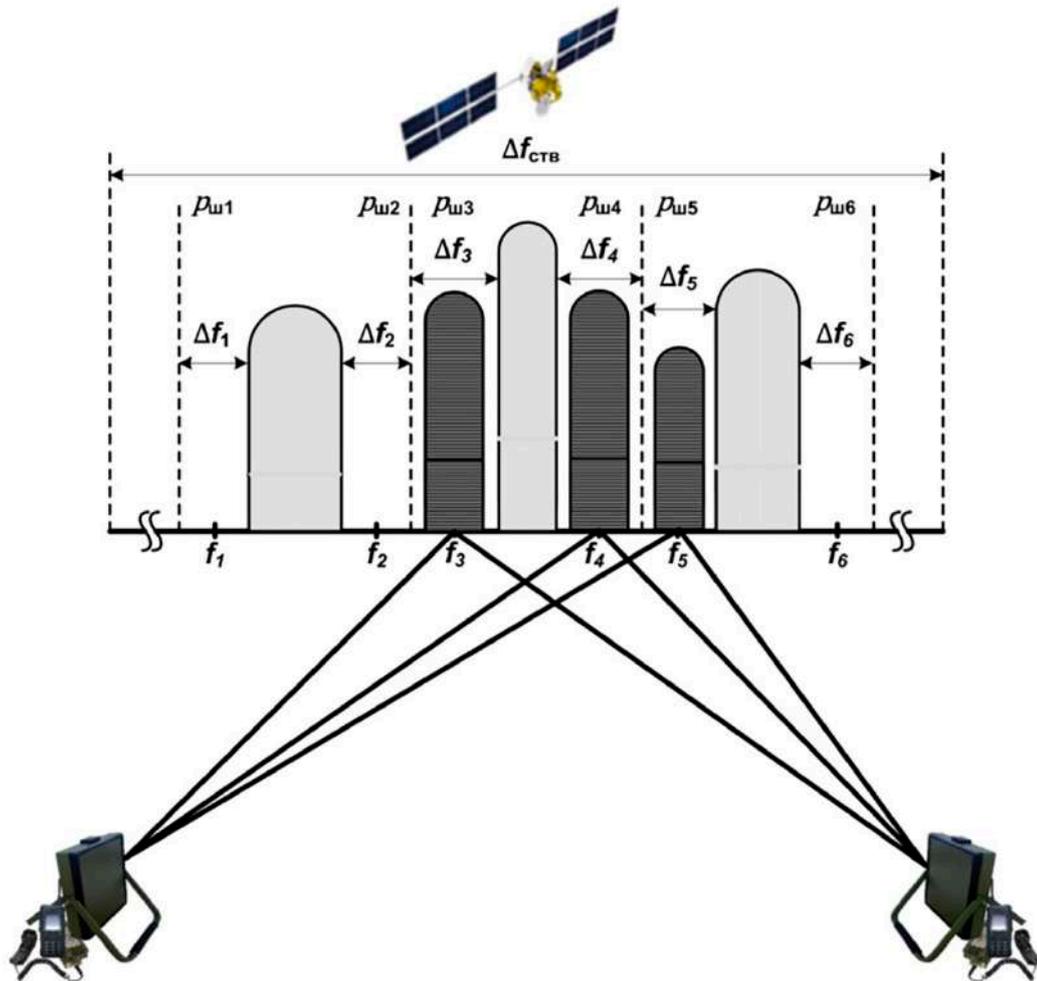


Рис. 2. Принцип работы двух земных станций с парциальными каналами в стволе с прямой ретрансляцией сигналов

При работе ЗС несколькими ПК, каждый из которых имеет набор параметров ($V_{ij}, f_{ij}, P_{ij}, Mod_{ij}, Kod_{ij}$), где i — номер земной станции ($i = 1 \dots N$); j — номер ПК ($j = 1 \dots L$); L_i — количество ПК i -й ЗС; V_{ij} — абонентская скорость передачи ПК; f_{ij} — частота несущей ПК; P_{ij} — мощность излучения ПК; Mod_{ij} — модуляция несущей ПК; Kod_{ij} — вид и параметры помехоустойчивого кодирования.

На рисунке 3 показана структурная схема ЗС с ПК, подтверждающая возможность реализации методики повышения коэффициента использования частотного ресурса ствола ретранслятора с прямой ретрансляцией.

Устройство состоит из передающего тракта 1.1 (рис. 3) и приемного тракта 1.2 (рис. 3). Рассмотрим работу передающего тракта 1.1 (рис. 3).

Входной информационный поток V 1.1.1 (рис. 3) разделяют с помощью устройства деления потока на блоки 1.1.2 (рис. 3), на отдельные блоки (парциальные каналы) со скоростями $V_1 \dots V_m \dots V_M$. В качестве устройства деления потока

на блоки служит программируемый демультиплексор.

Далее с помощью устройства нумерации блоков 1.1.3 (рис. 3) присваивают каждому отдельному блоку его порядковый номер для правильного их объединения на приемной части. При выполнении этого действия используют механизмы протокола TCP (*Transmission Control Protocol*), оставляя нужные поля заголовка пакета (64 бита) [3]:

порт источника (*Source Port*, 16 бит) идентифицирует парциальный канал, по которому отправлены пакеты, служит для оценки качества канала;

порт назначения (*Destination Port*, 16 бит), на который отправлен пакет, идентифицирует земную станцию;

порядковый номер пакета (*Sequence Number*, 32 бит) используется для сборки данных на приеме.

поле данных (*Data*, от 46 до 1518 байт) — длина и порядок его формирования соответствует процедурам *Ethernet* [4].

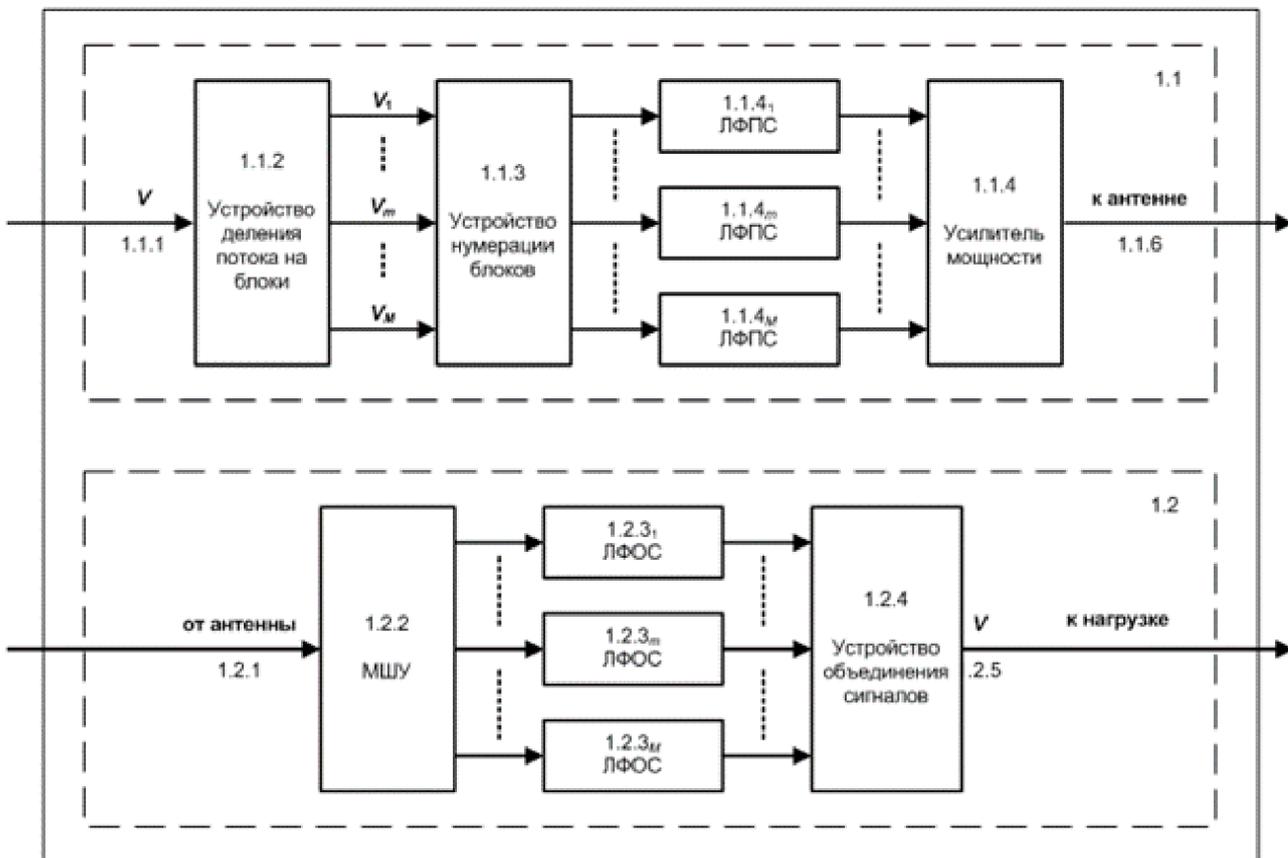


Рис. 3. Структурная схема земной станции при работе парциальными каналами

После завершения нумерации каждый отдельный блок в дальнейшем обрабатывают в своей линейке формирования парциального сигнала (ЛФПС) 1.1.41...1.1.4_м...1.1.4_М (рис. 3).

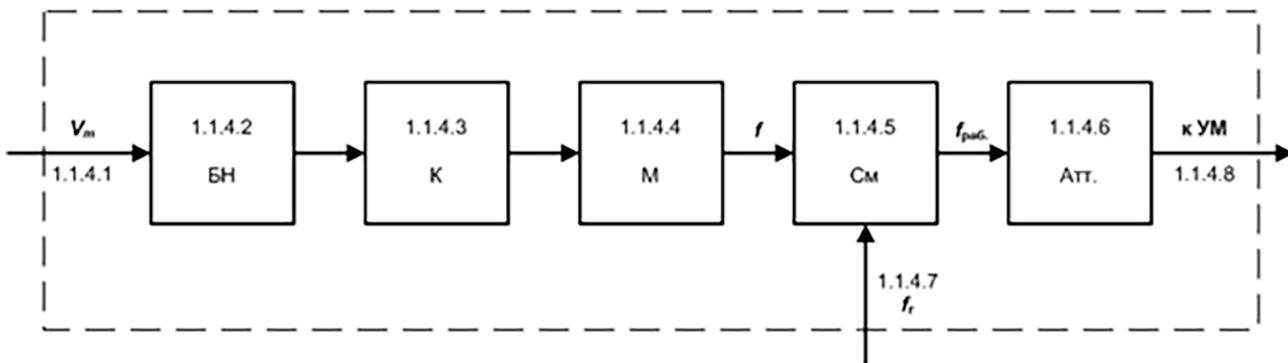


Рис. 4. Структурная схема линейки формирования парциального сигнала

Рассмотрим отдельную ЛФПС (рис. 4). После завершения нумерации блоков компенсируют различие скоростей каждого отдельного блока со скоростью V_m с входной скоростью V с помощью буферного накопителя 1.1.4.2 (рис. 4). Компенсация различия скоростей нужна для того, чтобы обработка информационного потока в каждом отдельном блоке после разделения и нумерации, не различалась по времени, т. е. обработка информации шла равномерно, без избыточности. Далее информационный блок кодируют с помощью кодера 1.1.4.3 (рис. 4), для надежной передачи данных. После кодирования информационный блок модулируют с помощью модулятора 1.1.4.4 (рис. 4). Далее несущее колебание информационного блока с частотой f переносят на рабочую частоту $f_{\text{раб}}$ с помощью смесителя 1.1.4.5 (рис. 4), работающего на частоте f_r , которая соответствует рабочей частоте ПК. Далее устанавливают баланс мощности сигнала информационного блока на входе усилителя мощности 1.1.4.8 (рис. 4) с помощью аттенюатора

1.1.4.6 (рис. 4) для достижения одинаковой вероятности ошибочного приема бита.

После формирования парциальных сигналов в линейках 1.1.4.1...1.1.4. m ...1.1.4. M (рис. 3), информационные сигналы усиливают с помощью усилителя мощности 1.1.4 (рис. 3), чтобы передать в нагрузку сигнал заданной мощности при минимальных нелинейных искажениях и максимальном коэффициенте полезного действия. Далее сформированные и усиленные парциальные сигналы передают на антенну и излучают.

В приемном тракте 1.2 (рис. 3) определяют коэффициент шума поступающих от антенны информационных сигналов с помощью маломощного усилителя (МШУ) 1.2.2 (рис. 3), чтобы повысить чувствительность приемного оборудования. Далее обрабатывают каждый информационный блок в своей линейке формирования обобщенного сигнала (ЛФОС) 1.2.3.1...1.2.3. m ...1.2.3. M (рис. 3). Рассмотрим отдельную ЛФОС (рис. 5).

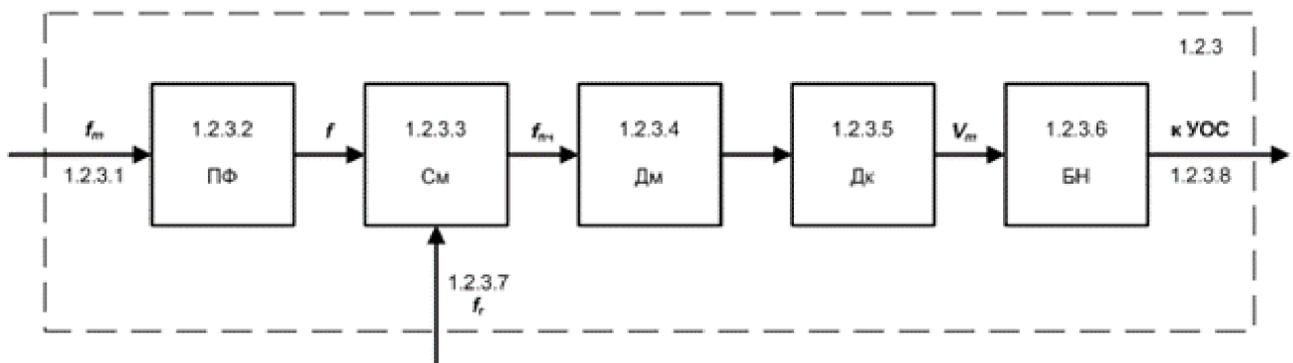


Рис. 5. Структурная схема линейки формирования обобщенного сигнала

После определения коэффициента шума приемных трактов выделяют из общего информационного потока необходимый блок с частотой f_m при помощи полосового фильтра (ПФ) 1.2.3.2 (рис. 5). Далее выделенный блок с частотой f переносят на промежуточную частоту $f_{\text{пч}}$ с помощью смесителя 1.2.3.3 (рис. 5), работающего на частоте f_r , чтобы в дальнейшем обработка сигнала проходила на одной частоте — $f_{\text{пч}}$. После информационный блок демодулируют с помощью демодулятора 1.2.3.4 (рис. 5), чтобы выделить низкочастотный (информационный) сигнал. Схема демодуляции строится в зависимости от выбранной схемы модуляции. Далее информационный блок декодируют с помощью декодера

1.2.3.5 (рис. 5), чтобы восстановить исходный информационный сигнал и исправить ошибки, которые могли возникнуть при его передаче. На выходе ЛФОС 1.2.3.8 (рис. 5) компенсируют различие скоростей V_m линейки со скоростью V обобщенного информационного потока при помощи буферного накопителя 1.2.3.6 (рис. 5), чтобы обработка обобщенного информационного потока не различалась по времени, т. е. обработка информации шла последовательно, без избыточности.

После формирования обобщенных сигналов в линейках 1.2.3.1...1.2.3. m ...1.2.3. M (рис. 3), информационные сигналы объединяют с помощью устройства объединения сигналов 1.2.4 (рис. 3) в

единый информационный поток со скоростью V . В качестве устройства объединения сигналов может служить программируемый мультиплексор [5]. После обобщенный сигнал подают в нагрузку.

Усилитель мощности ЗС реализуется аппаратно и является общим для всех парциальных каналов. Так как скорость передачи парциальных каналов 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, которые, в общем случае, являются общими для всех парциальных каналов, можно определить требуемое общее значение $h^2 = P_c/P_{ш}$ на входе демодуляторов парциальных каналов.

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

$$P_{ш i} = n_{ш} k T_0 \Delta f_i, \quad (2)$$

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

Для i -го и j -го парциальных каналов:

$$h^2 = \frac{P_{c j}}{P_{ш j}} = \frac{P_{c i}}{P_{ш i}}, \quad (3)$$

откуда баланс мощностей излучаемых сигналов:

$$\frac{P_{c i}}{P_{ш i}} = \frac{\Delta f_i}{\Delta f_j} = \frac{V_i}{V_j}. \quad (4)$$

Выходной усилитель работает в многосигнальном режиме. Его мощность делится между парциальными каналами в соответствии с балансом их мощностей на его входе. Выходная мощность i -го парциального канала:

$$P_{вых i} = P_{ум} \frac{P_{вх i}}{\sum_{j=1}^M P_{вх j}} = P_{ум} \frac{V_i}{\sum_{j=1}^M V_j}, \quad (5)$$

где $P_{ум}$ — мощность усилителя; $P_{вх i}$ — мощность i -го парциального канала на входе усилителя [6].

Данный способ передачи и приема парциальных каналов может быть реализован на современных вычислительных процессорах методами цифровой обработки сигналов, а их количество может исчисляться десятками [7, 8].

На рисунке 6 представлен вариант построения модема земной станции с парциальными каналами на современной элементной базе.

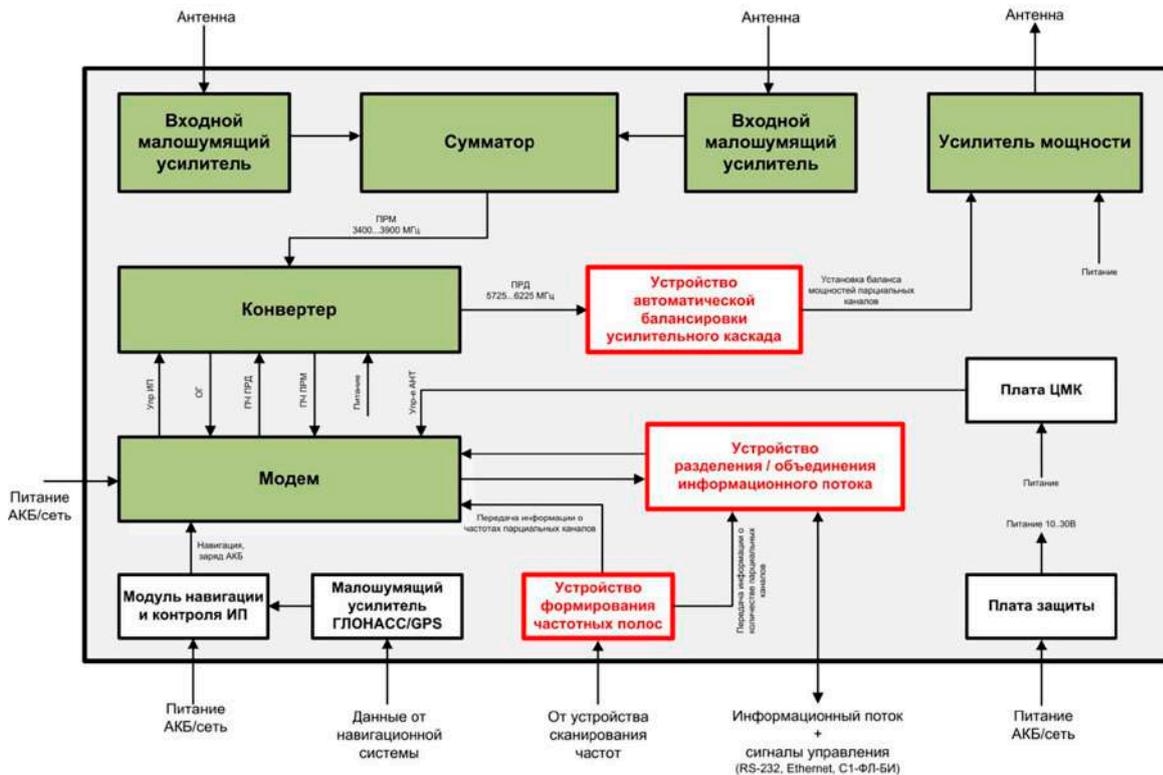


Рис. 6. Вариант построения модема земной станции с парциальными каналами

Рассмотрим работу станции на передачу. Информационный сигнал подается на устройство разделения информационного потока, где он разделяется на несколько потоков со своими скоростями (количество потоков и скорости каждого потока поступают с устройства формирования частотных полос). Далее информационный сигнал поступает на модем, где он кодируется, модулируется согласно установленным параметрам (сигнал опорной частоты поступает с конвертера). После сформированный сигнал подается на конвертер, где он переносится на передающие частоты станции. С конвертера информационные сигналы поступают на устройство автоматической балансировки усилительного каскада, с помощью которого соблюдается баланс мощностей на входе усилителя мощности. После чего усиленный сигнал поступает на антенну.

При работе станции на прием, принимаемые сигналы с антенны через СВЧ тракт поступают на входной малошумящий усилитель. Далее через сумматор усиленный принимаемый сигнал подается на конвертер, в котором он переносится на промежуточную частоту. С выхода конвертера сформированный сигнал подается на модем, где узкополосные сигналы оцифровываются,

демодулируются и декодируются (каждый по своему каналу). После информационные потоки поступают в устройство объединения, где формируется общий информационный поток, который подается на пульт управления и оконечную аппаратуру [9, 10].

Выводы

В настоящее время появляются новые услуги связи, которые требуют повышенной пропускной способности в каналах связи. Кроме того, в существующей системе спутниковой связи каналы радиолиний жестко закрепляются за станциями и не имеют возможности оперативного перераспределения информационной нагрузки, что снижает пропускную способность ретрансляторов связи в целом.

В статье рассмотрены научно-технические предложения по реализации земной станции специального назначения, работающей парциальными каналами. Полученные результаты позволяют устранить вышеуказанные недостатки современной системы спутниковой связи, к тому же, использование предложенных земных станций повышают устойчивость к деструктивным воздействиям.

Рецензент:

Бурлаков Сергей Олегович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Военных систем космической, радиорелейной, тропосферной связи и навигации Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург. E mail: SOBurlakov@yandex.ru

Литература

1. Бурлаков С. О., Драгунов М. Ю., Мишин Д. Ю., Новиков Е. А. Методика распределения частот спутникового ретранслятора для работы земных станций с парциальными каналами // Труды военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2024. № 691. С. 26-31.
2. Немировский М.С., Локшин Б.А., Аронов Д.А. Основы построения систем спутниковой связи / М.: Горячая линия – Телеком, 2021. 432 с. ISBN: 978-5-9912-0580-1
3. Фаткиева Р.Р. Основы построения защищенных компьютерных сетей. Протокол TCP. – СПб.: СПбЭТУ «ЛЭТИ», 2021. 16 с.
4. Гостев В.М. Архитектура сетей Ethernet.: Учебно-методическое пособие. – Казань.: КФУ ИВМиИТ, 2021.
5. Спиридонов С.Б. Схемотехника дискретных устройств. – Москва.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020.
6. 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.
7. Балясников А.Г. Методы цифровой обработки измерительных сигналов / А.Г. Балясников, Д.Р. Абросимов, Н.Г. Логинов, А.Ю. Тычков // Инжиниринг и технологии. – 2020. – Vol. 5(2). – С. 1-6.
8. Сгибнева Е.А. Методы обработки сигналов в телекоммуникационных системах // Вестник связи. 2023. №8. С. 26-30.
9. Белов А.С., Алдошин А.И., Абакумова А.Ю. Отечественные модемы земных станций спутниковой связи // Электросвязь. 2020. №1. С. 27-36.
10. Вергелис Н.И., Липатов И.А., Тоцкий С.Е. и др. Подвижная станция спутниковой связи // Патент РФ № 2729037 Заявлено 31.01.2020 г. Опубликовано 04.08.2020 г.

EARTH STATION CONSTRUCTION PROPOSALS WITH PARTIAL CHANNELS

Dragunov M.Yu.¹

Keywords: communication repeater, satellite radio link, frequency resource, power balance, bandwidth, frequency resource utilization factor, information packet, TCP protocol.

Objective: to consider the features of the construction of an earth station with partial channels for the needs of military consumers.

Result: a variant of construction of an earth station capable of operating partial channels in the trunk of a relay with direct relay is proposed. In contrast to the existing options for the construction of earth stations operating in a trunk with direct relay of signals, where each earth station is allocated a frequency resource of the trunk of the communication repeater within one range, the proposed earth station uses the entire frequency resource of the repeater trunk. At the same time, there is no retuning of the frequency of already operating earth stations, the choice of frequency ranges for partial channels of one earth station is carried out based on the requirements for the quality of communication. The paper presents structural diagrams of a receiver and transmitter of an earth station with partial channels, as well as a variant of the implementation of the proposed earth station scheme.

Practical significance: the possibility of implementing the method of distributing the frequency resource of the repeater at earth stations when implementing the algorithm in the software of satellite routers and its refinement for the possibility of automated scanning of the frequencies of the trunk of the communication repeater and the organization of partial channels.

Reviewer:

Sergey O. Burlakov, Dr.Sc. of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Military Systems of Space, Radio Relay, Tropospheric Communication and Navigation, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St. Petersburg. E mail: SOBurlakov@yandex.ru

References

1. 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 // Trudy voenno-kosmicheskoj akademii imeni A. F. Mozhajskogo. 2024. № 691. S. 26-31.
2. Nemirovskij M.S., Lokshin B.A., Aronov D.A. Osnovy postroenija sistem sputnikovoj svjazi / M.: Gorjachaja linija – Telekom, 2021. 432 s. ISBN: 978-5-9912-0580-1
3. Fatkueva R.R. Osnovy postroenija zashhishhennyh komp'juternyh setej. Protokol TCP. – SPb.: SPbJeTU «LJeTI», 2021. 16 s.
4. Gostev V.M. Arhitektura setej Ethernet.: Uchebno-metodicheskoe posobie. – Kazan'.: KFU IVMiIT, 2021.
5. Spiridonov S.B. Shemotehnika diskretnyh ustrojstv. – Moskva.: MG TU im. N.Je. Bauman, 2020.
6. 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.
7. Baljasnikov A.G. Metody cifrovoj obrabotki izmeritel'nyh signalov / A.G. Baljasnikov, D.R. Abrosimov, N.G. Loginov, A.Ju. Tychkov // Inzhiniring i tehnologii. – 2020. – Vol. 5(2). – S. 1-6.
8. Sgibneva E.A. Metody obrabotki signalov v telekommunikacionnyh sistemah // Vestnik svjazi. 2023. №8. S. 26-30.
9. Belov A.S., Aldoshin A.I., Abakumova A.Ju. Otechestvennye modemy zemnyh stancij sputnikovoj svjazi // Jelektrosvjaz'. 2020. №1. S. 27-36.
10. Vergelis N.I., Lipatov I.A., Tockij S.E. i dr. Podvizhnaja stancija sputnikovoj svjazi // Patent RF № 2729037 Zajavleno 31.01.2020 g. Opublikovano 04.08.2020 g.

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

