

Системы, сети и устройства телекоммуникаций

DOI 10.24412/2221-2574-2022-3-51-63

УДК 621.396.49

ПРОЕКТИРОВАНИЕ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ РАДИОЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Славянский Андрей Олегович

советник заместителя генерального директора по космическим и авиационным системам АО «ЦНИРТИ им. академика А. И. Берга»¹.

E-mail: andrey.slavyanskiy@gmail.com

Шпак Александр Васильевич

доктор технических наук, профессор кафедры телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информатики МИРЭА - Российский технологический университет².

E-mail: alexandr.shpack@yandex.ru

¹Адрес: 107078, Российская Федерация, г. Москва, ул. Новая Басманная, д. 20, стр. 9.

²Адрес: 119454, Российская Федерация, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78.

Аннотация: В статье рассмотрены вопросы создания бортовой аппаратуры высокоскоростной радиолинии передачи информации с интегральным значением скорости передачи данных не менее 800 Мбит/с. Параметры предлагаемой разработки, в том числе скорость передачи, массогабаритные характеристики и энергопотребление, позволяют обеспечить потенциальные потребности космической отрасли в радиолиниях, в том числе возможность оперативной передачи больших объемов информации с новейших космических аппаратов ДЗЗ на Землю. Дана оценка достижимых характеристик аппаратуры при работе в различных диапазонах частот, при этом учитывались существующие ограничения на ширину спектра сигнала, а также определялся энергетический потенциал радиолинии. Для обеспечения выполнения требования к передаче по высокоскоростной радиолинии мониторинговой информации со скоростью 800–1000 Мбит/с предлагается использовать фазоманипулированный сигнал с модуляцией 8PSK. Для обеспечения возможности изменения скорости передачи информации в зависимости от энергетического состояния радиолинии и помеховой обстановки предлагается парциальное построение высокоскоростного канала в диапазоне частот 10,7...11,7 ГГц. При проектировании бортовой аппаратуры учитывалось требование по ее функционированию в составе перспективной мало массогабаритной бортовой аппаратуры с малыми энергопотреблением (до 300 Вт) и массой (до 80 кг), ориентированной на использование в составе малых космических аппаратов.

Ключевые слова: высокоскоростная радиолиния, космический аппарат, бортовая аппаратура, пункт приёма информации, парциальные сигналы.

Введение

Высокоскоростная радиолиния передачи информации (ВРЛ ПИ) предназначена для передачи целевой информации от космического аппарата (КА) на наземные пункты приёма информации (ППИ).

В соответствии с Международным Регламентом Радиосвязи для передачи данных в направлении космический аппарат — земная

станция фиксированной спутниковой службы отведены следующие полосы частот [1]:

– в пределах С-диапазона частот — от 3,4 до 3,6 ГГц, от 3,6 до 4,2 ГГц, от 4,5 до 4,8 ГГц, от 7,25 до 7,3 ГГц, от 7,3 до 7,45 ГГц, от 7,45 до 7,55 ГГц, от 7,55 до 7,75 ГГц;

– в пределах Х-диапазона частот — от 10,7 до 11,7 ГГц;

– в пределах Ки-диапазона частот — от 12,5 до 12,75 ГГц, от 17,3 до 17,7 ГГц, от 17,7

до 18,1 ГГц;

– в пределах Ku-диапазона частот — от 18,1 до 18,4 ГГц, от 18,4 до 18,6 ГГц, от 18,6 до 18,8 ГГц, от 18,8 до 19,3 ГГц, от 19,3 до 19,7 ГГц, от 20,2 до 21,2 ГГц;

– в пределах Ka-диапазона частот — от 37,5 до 40,0 ГГц; от 40,0 до 42,5 ГГц.

Особенностью проектирования радиолиний ВРЛ ПИ является необходимость учёта дополнительного ослабления сигнала в тропосфере Земли, а также флуктуаций и искажений сигнала в ионосфере.

Методы прогнозирования различных параметров распространения радиосигнала, необходимые при планировании систем связи «Космос-Земля» и «Земля-Космос», изложены в рекомендации Международного Союза Электросвязи Recommendation [2, 3].

Проектирование радиолинии ВРЛ ПИ производилось с учётом следующих параметров, заданных исходными данными:

– максимальное значение высоты орбиты КА – 600 км;

– минимальное значение угла наблюдения КА над горизонтом — 7 град.;

– интегральное значение скорости передачи данных — от 800 до 1000 Мбит/с;

– диаметр рефлектора антенной системы на ППИ — до 5 м;

– вероятность ошибки передачи данных – не более 1×10^{-6} на бит;

– коэффициент оперативной готовности ВРЛ ПИ – не менее 0,98.

При определении оптимального частотного диапазона был проведён расчёт энергетических характеристик радиолинии «КА-ППИ» с учётом потерь в атмосфере Земли, обусловленных поглощением сигнала в атмосферных газах, в облаках и в дожде, потерь, обусловленных быстрыми замираниями сигнала, что связано с наличием мелкомасштабных изменений индекса рефракции в атмосфере Земли и шумовым излучением от поглощающей среды, а также влияния ионосферы на флуктуации амплитуды и фазы, а также временных параметров сигнала [4].

Также в ходе проектирования были определены оптимальные значения ширины полосы для каждого из рассмотренного диапазона с учётом ограничений на увеличение полосы частот за счёт увеличения энергии сигнала, определяемые мультипликативным характером помехи [5], возникающей в дисперсном канале, и ограничений, вызванные бюджетом системы энергопитания КА.

Оценка характеристик в различных диапазонах частот

Для обеспечения интегрального значения информационной скорости высокоскоростной радиолинии передачи информации 1000 Мбит/с на наземные ППИ в диапазоне частот 3,4 ГГц...3,9 ГГц в условиях существующих ограничений на ширину спектра сигнала необходимо применение метода частотного уплотнения парциальных сигналов [6], при этом максимальное значение скорости передачи данных для каждого из парциальных сигналов не может превышать 144 Мбит/с. При формировании парциальных сигналов целесообразно применение модуляции типа 8PSK, обеспечивающей эффективное использование частотного ресурса в совокупности с приемлемыми энергетическими характеристиками [7]. Применение модуляции типа QAM не предполагается в связи с необходимостью обеспечения существенно более высоких требований к усилителю мощности, как в части уровня выходной мощности, так и линейности амплитудной характеристики [8]. При этом регулирование скорости передачи информации на наземные ППИ может осуществляться как посредством изменения количества парциальных сигналов в групповом сигнале, так и снижением скорости передачи данных в любом из парциальных сигналов, что обеспечит увеличение энергетического запаса ВРЛ ПИ.

В диапазоне частот 7,25...7,75 ГГц для обеспечения интегрального значения информационной скорости необходимо осуществлять передачу данных на одной несущей с применением модуляции QAM16 и современ-

ных методов помехоустойчивого кодирования [9] с параметрами, соответствующими максимальному значению ширины спектра сигнала не менее 430 МГц. В случае невозможности технической реализации демодулятора сигнала с указанными характеристиками вид модуляции должен быть изменен на 8PSK. При этом с учётом защитных частотных интервалов между спектрами парциальных сигналов потребуется дополнительно задействовать полосу частот от 7,75 ГГц до 8,15 ГГц.

Для диапазона частот 10,7... 11,7 ГГц характерным является повышенный уровень дополнительных потерь в атмосфере и незначительное воздействие на характеристики сигнала физических явлений, происходящих в ионосфере Земли [10]. Передача информации на наземные ППИ в диапазоне частот 10,7 ГГц... 11,7 ГГц с интегральным значением информационной скорости 1000 Мбит/с может осуществляться как посредством группового сигнала, состоящего из нескольких парциальных сигналов с энергетически более эффективной модуляцией QPSK с применением метода частотного уплотнения, так и сигнала со сложным видом модуляции (16QAM, 8PSK). Максимальное значение информационной скорости передачи СИ для каждого из парциальных сигналов — 150 Мбит/с. При суммировании сигналов в антенно-фидерном тракте [11] расстановка несущих в пределах диапазона частот может быть эквидистантной, при формировании сигнала до усилителя мощности — неэквидистантной.

Для диапазона частот 20,2...21,2 ГГц характерным является высокий уровень дополнительных потерь в атмосфере и их существенная частотная зависимость, приводящая к искажениям амплитудного спектра сигнала [12, 13]. Воздействием на характеристики сигнала физических явлений, происходящих в ионосфере Земли, можно пренебречь, поэтому на КА и ППИ возможно применение линейно-поляризованных антенных систем. Частичная компенсация искажений амплитудного спектра сигнала может быть решена по аналогии с

диапазоном частот 10,7 ГГц... 11,7 ГГц применением амплитудно-частотного корректора в передающем или приёмном тракте. Величина остаточной неравномерности, которая не может быть устранена вследствие недетерминированного изменения во времени ослабления сигнала в атмосфере Земли [14], в совокупности с допустимым уровнем искажений определяют предельно допустимое значение максимальной ширины спектра сигнала и, соответственно, максимальное значение информационной скорости. Для более точной компенсации потребуется применение системы контроля величины неравномерности в реальном масштабе времени, что потребует существенного усложнения аппаратно-программных средств как бортовой, так и наземной аппаратуры.

Принимая во внимание величину дополнительных потерь в атмосфере Земли в диапазоне частот 37,5...42,5 ГГц (50,4 дБ при угле $\beta = 7$ град) [15], можно сделать однозначный вывод о невозможности реализации ВРЛ ПИ с требуемыми характеристиками в рассматриваемой полосе частот.

Для обеспечения выполнения требования к передаче по высокоскоростной радиолинии мониторинговой информации со скоростью 800–1000 Мбит/с предлагается использовать фазоманипулированный сигнал с модуляцией 8PSK [16]. Для обеспечения возможности изменения скорости передачи информации в зависимости от энергетического состояния радиолинии и помеховой обстановки предлагается парциальное построение высокоскоростного канала. Итоговый сигнал формируется путём суммирования в модуле суммирования каналов 7 сигналов, который переносится на выходную частоту 10700...11700 МГц в повышающем конвертере.

Бортовая аппаратура высокоскоростной радиолинии

При разработке бортовой аппаратуры (БА) ВРЛ передачи информации с борта КА учиты-

валось, что она должна обеспечивать решение следующих задач:

- передача по высокоскоростной радиолинии (800–1000 Мбит/сек) мониторинговой информации;
- прием и хранение предварительно обработанной, сжатой, зашифрованной и закодированной мониторинговой и иной информации от бортового комплекса обработки сигналов и бортового комплекса управления;
- приём и размножение опорной частоты 100 МГц от бортового синхронизирующего устройства;
- функционирование от бортовой сети ± 24 В;
- функционирование в составе перспективной мало массогабаритной бортовой аппаратуры с малыми энергопотреблением (до 300 Вт) и массой (до 80 кг), ориентированной на использование в составе малых космических аппаратов.

В соответствии с заданными требованиями определён следующий состав бортовой аппаратуры ВРЛ:

- модуль управления и хранения данных;
- модуль размножения опорной частоты;
- модуль цифро-аналоговых преобразователей;
- модуль высокоскоростного квадратурного модулятора;
- модуль суммирования каналов;
- повышающий конвертор;
- усилитель мощности;
- вторичные источники питания.

Управление базовыми элементами ВРЛ ПИ осуществляет бортовой комплекс управления (БКУ) КА по командному интерфейсу. От БКУ поступают команды на запись в память мониторинговой информации, на её считывание и выдачу по ВРЛ ПИ на ППИ. От модуля управления и хранения данных в БКУ поступает информация функционального контроля (ИФК) о состоянии аппаратуры ВРЛ ПИ и квитанции на команды управления (КУ), поступившие от БКУ.

Информация, поступающая от аппаратуры предварительной обработки информации, записывается параллельно в 7 модулей памяти. Восьмой модуль резервный.

Синхронизация базовых элементов ВРЛ ПИ осуществляется по синусоидальному сигналу 100 МГц, поступающему от БКУ. Опорный сигнал размножается и усиливается до требуемого уровня в модуле размножения опорной частоты и поступает в аппаратуру ВРЛ ПИ.

В соответствии с текущей конфигурацией программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) модуля управления и хранения информации осуществляется установка соответствующих частот синтезаторов канальной частоты в модуле высокоскоростных канальных модуляторов, синтезатора несущей частоты в повышающем конвертере.

После получения сигналов готовности от модулей квадратурного модулятора, повышающего конвертера, усилителя мощности ПЛИС модуля управления и хранения данных начинает передачу мониторинговой информации из семи модулей памяти на входы цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) модуля ЦАП, которые производят перенос цифровых данных в аналоговые синфазные и квадратурные модулирующие сигналы для формирования в модуле высокоскоростного квадратурного модулятора сигнала промежуточной частоты с заданным видом модуляции и шириной полосы частот.

Сформированные в семи ЦАП сигналы поступают на соответствующие квадратурные модуляторы для формирования сигналов промежуточной частоты в диапазоне частот от 1700 до 2700 ГГц. Номиналы промежуточной частоты для каждого квадратурного модулятора задаются ПЛИС модуля управления и хранения данных в соответствии с текущей конфигурацией.

Модулированные сигналы с выходов квадратурных модуляторов усиливаются и поступают на сумматоры модуля суммирования каналов. Усиление необходимо для компенсации потерь в модулях.

Модуль суммирования каналов осуществляет суммирование парциальных сигналов, поступающих от 7 квадратурных модуляторов (7 каналов) в сигнал с единой полосой от 1700 до 2700 МГц и выдачу его в модуль повышающего конвертера.

В повышающем конвертере производится перенос модулированного сигнала промежуточной частоты на частоту 10700...11700 МГц с целью её последующего усиления в усилителе мощности.

Усиленный в усилителе мощности до необходимого уровня сигнал поступает в антенно-фидерное устройство.

Модуль управления и хранения данных

В состав модуля управления и хранения данных входят:

- ПЛИС управления XC2V6000;
- 8 модулей хранения информации по 32 Гб каждый;
- параллельный интерфейс для взаимодействия с аппаратурой предварительной обработки мониторинговой информации;
- параллельный интерфейс для взаимодействия с БКУ;
- оперативная память;
- конфигурационная память;
- модуль отладки ПЛИС управления;
- преобразователи питания.

Модуль управления и хранения данных осуществляет взаимодействие с БКУ КА и аппаратурой предварительной обработки мониторинговой информации; запись данных, поступающих из аппаратуры предварительной обработки мониторинговой информации в устройство хранения и считывание записанной информации и передачу в ЦАП для преобразования цифровых данных в аналоговый сигнал, необходимый для квадратурной модуляции; управление модулем ЦАП, модулем высокоскоростного квадратурного модулятора, повышающим конвертером с целью формирования из принятых данных широкополосного сигнала для передачи на ППИ мониторинговой информации по сигналу, поступающему из

БКУ КА; хранение типовых конфигураций аппаратуры высокоскоростной радиолинии передачи информации с борта КА и реконфигурацию аппаратуры высокоскоростной радиолинии передачи информации с борта КА по командам из БКУ КА; также реализуется сбор и выдача в БКУ информации функционального контроля о состоянии аппаратуры. Функциональная схема модуля управления и хранения данных представлена на рис. 1.

Опорный сигнал 100 МГц поступает с модуля размножения опорной частоты. Сигнал от БКУ по командному параллельному интерфейсу поступает в ПЛИС управления семейства Virtex-II. По сигналу от БКУ происходит запись данных, поступающих из аппаратуры предварительной обработки мониторинговой информации по параллельному информационному интерфейсу в устройства хранения данных емкостью 256 Гбит каждый. Во время проведения сеанса с ППИ по команде из БКУ производится считывание и передача записанной информации в модуль ЦАП для преобразования цифровых данных в аналоговые синфазный и квадратурный сигналы.

Сформированные сигналы поступают на квадратурные модуляторы модуля высокоскоростного квадратурного модулятора, в котором ПЛИС осуществляет управление синтезатором канальной частоты, построенном на микросхемах синтезатора с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ). Также ПЛИС осуществляет управление синтезатором несущей частоты типа ADF4108 в повышающем конвертере, осуществляющем преобразование промежуточной частоты в несущую частоту с модуляцией 8PSK для дальнейшего усиления и передачи информации на ППИ.

В конфигурационной памяти ПЛИС хранятся конфигурации для загрузки ПЛИС управления аппаратуры высокоскоростной радиолинии передачи информации для изменения скорости передачи информации в зависимости от энергетических характеристик высокоскоростной радиолинии передачи информации.



Рис. 1. Функциональная схема модуля управления и хранения данных

Модуль отладки ПЛИС управления состоит из ПЛИС CPLD, памяти M25P объемом 128 Мбит, вспомогательного генератора серии CFPT-126, преобразователя FT232RL USB-UART, и предназначен для отладки, контроля функционирования модуля управления и хранения данных и остальных базовых элементов ВРЛ ПИ, взаимодействия их с базовыми элементами аппаратуры обработки мониторинговой информации, БКУ на этапе отладки и проведения испытаний. Для возможности отладки модуля управления и хранения данных при отсутствии опорного сигнала от БСУ в его состав входит кварцевый генератор.

Модуль размножения опорной частоты

Модуль размножения опорной частоты предназначен для обеспечения элементов высокоскоростной радиолинии передачи информации с борта КА высокостабильной опорной частотой 100 МГц, поступающей от бортового синхронизирующего устройства (БСУ). Выбор значения опорной частоты определяется значением опорной частоты, поступающим от БСУ. Функциональная схема модуля размно-

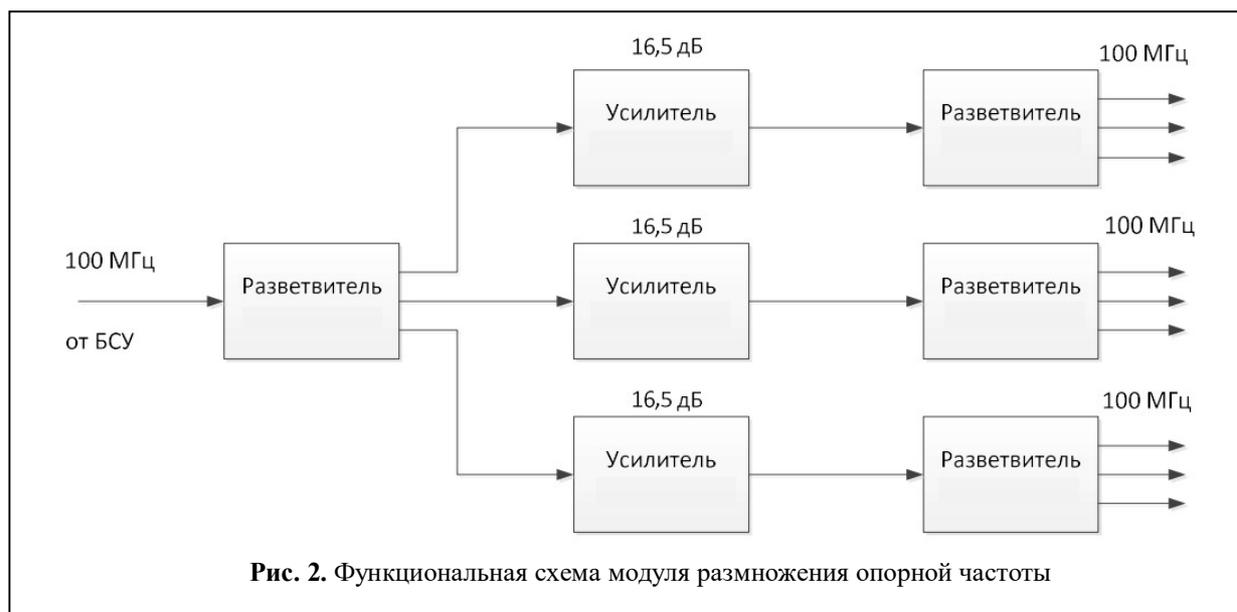
жения опорной частоты представлена на рис. 2.

В состав модуля размножения опорной частоты входят 4 сплиттера (делители/сумматоры) на три канала каждый и 3 широкополосных линейных усилителя с фиксированным коэффициентом усиления, работающих на частотах до 1000 МГц. Сигнал высокостабильной опорной частоты поступает на делитель от БСУ. На усилителях происходит усиление сигнала на 16,5 дБ для компенсации ослабления входного сигнала на первом делителе и усиления до уровня, достаточного для компенсации ослабления выходного сигнала на выходных делителях.

С девяти выходов модуля размножения опорной частоты опорный сигнал требуемого уровня не менее 0,5...0,9 В поступает на ПЛИС управления, синтезаторы высокоскоростного квадратурного модулятора и повышающего конвертора.

Модуль цифро-аналоговых преобразователей

Модуль ЦАП предназначен для формирования из данных, поступающих от модуля управления и хранения информации, аналогового син-



фазного и квадратурного модулирующего сигнала для формирования в модуле высокоскоростного квадратурного модулятора сигнала промежуточной частоты с заданным видом модуляции и шириной полосы частот. Функциональная схема модуля ЦАП представлена на рис. 3.

В состав модуля ЦАП входят линейные преобразователи питания, семь двухканальных 16-разрядных цифро-аналоговых преобразователей с частотой тактирования до 1200 МГц по числу поддиапазонов (каналов) и фильтры нижних частот (НЧ).

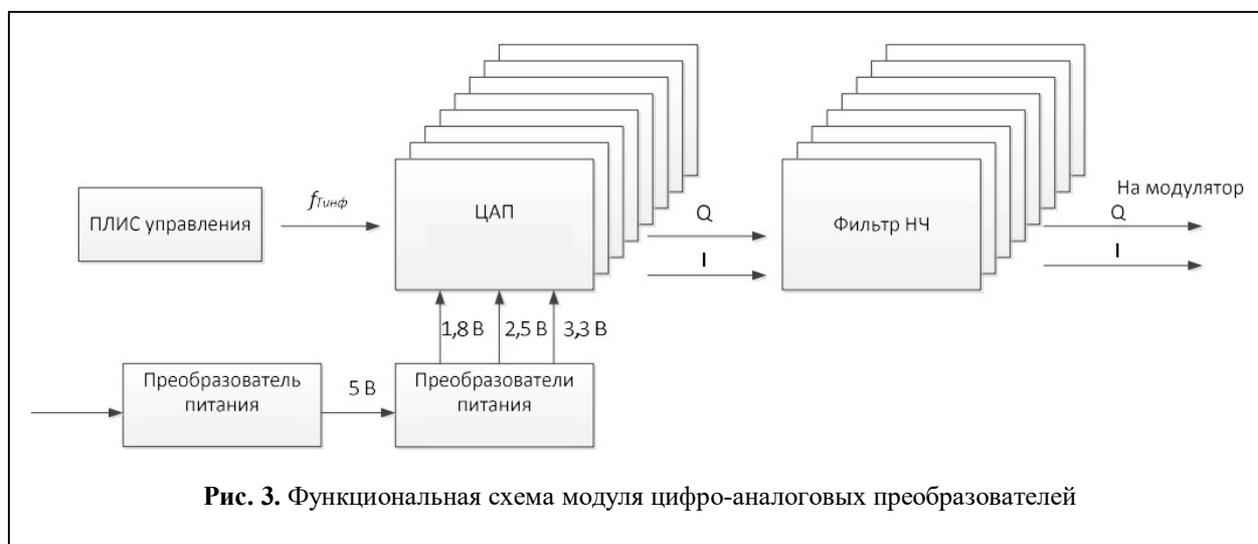
В модуле ЦАП происходит формирование из данных, поступающих от модуля управле-

ния и хранения информации, аналогового синфазного и квадратурного модулирующего сигнала для формирования в модуле высокоскоростного квадратурного модулятора сигнала промежуточной частоты с заданным видом модуляции и шириной полосы частот.

Модуль высокоскоростного квадратурного модулятора

Модуль высокоскоростного квадратурного модулятора предназначен для формирования сигнала промежуточной частоты с заданным видом модуляции и шириной полосы частот.

Необходимо сформировать модулированный сигнал промежуточной частоты в диа-



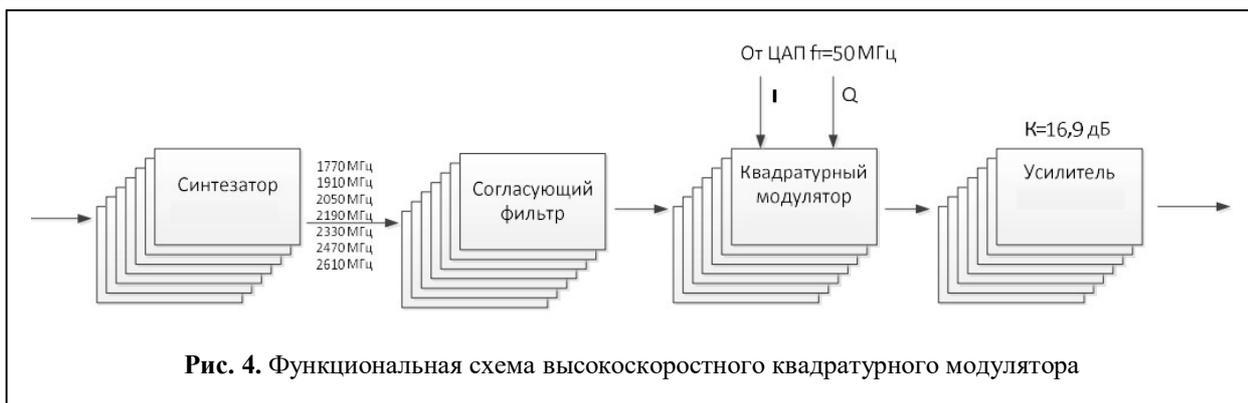


Рис. 4. Функциональная схема высокоскоростного квадратурного модулятора

пазоне частот от 1700 до 2700 ГГц. В качестве синтезатора канальной частоты предлагается использовать интегрированный синтезатор с целочисленным коэффициентом деления и генераторы, управляемые напряжением (ГУН), серии ADF4360 с диапазоном выходных частот 2400...2725 МГц, 2050...2450 МГц, 1850...2170 МГц, 1600...1950 МГц соответственно. Модуль высокоскоростного квадратурного модулятора состоит из семи модулей по числу поддиапазонов (каналов), на которые разбит выходной сигнал. В состав каждого модуля квадратурного модулятора входят синтезатор канальной частоты, согласующий фильтр, квадратурный модулятор, предназначенный для работы в диапазоне частот от 400 МГц до 6 ГГц, и выходной усилитель ВЧ диапазона 400 МГц...2700 МГц с выходной мощностью $\frac{1}{4}$ Ватт. Функциональная схема высокоскоростного квадратурного модулятора представлена на рис. 4.

На квадратурный модулятор каждого канала поступают два дифференциальных модулирующих сигнала от ЦАП и несимметричный сигнал гетеродина. На синтезаторах формируются промежуточные частоты гетеродинов: 1770 МГц, 1910 МГц, 2050 МГц, 2190 МГц, 2330 МГц, 2470 МГц, 2610 МГц. Модулированные сигналы высокой частоты с выхода квадратурных модуляторов усиливаются на 16,5 дБ на усилителях и поступают на сумматоры модуля суммирования каналов.

Модуль суммирования каналов

Модуль суммирования каналов предназначен для обеспечения суммирования сигналов, поступающих от семи квадратурных модуляторов (каналов) в сигнал с единой полосой от 1700 до 2700 МГц и выдачу его в модуль повышающего конвертера. Функциональная схема модуля суммирования каналов представлена на рис. 5.



Рис. 5. Функциональная схема модуля суммирования каналов

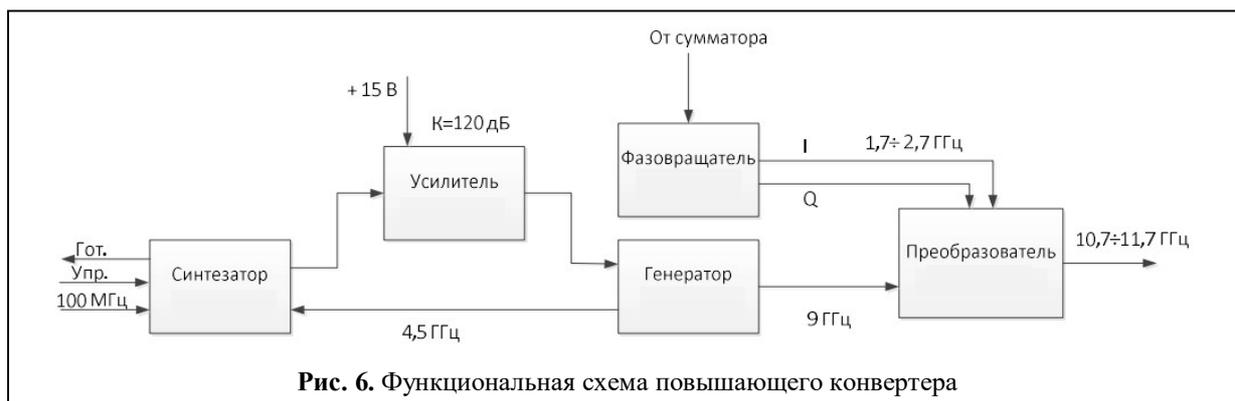


Рис. 6. Функциональная схема повышающего конвертера

В состав модуля суммирования каналов входят сплиттеры (делители/сумматоры) на четыре и два канала соответственно, и усилители, обеспечивающие мощность выходного сигнала более 17 дБм при частоте 2140 МГц и напряжении смещения 5 В, поддерживая при этом коэффициент мощности в соседнем канале на уровне минус 55 дБн. В модуле суммирования каналов происходит суммирование сигналов, поступающих от квадратурных модуляторов в сигнал с единой полосой от 1700 до 2700 МГц, после чего парциальные сигналы, поступающие с выходов сумматоров, усиливаются на 16,9 дБ. Усиленные сигналы с выходов широкополосных усилителей поступают на вход широкополосного сумматора и после суммирования с поступают в модуль повышающего конвертера.

Повышающий конвертер

Повышающий конвертер предназначен для переноса модулированного сигнала промежуточной частоты 1700...2700 МГц на частоту 10700...11700 МГц с целью ее последующего усиления в усилителе мощности. Функциональная схема повышающего конвертера представлена на рис. 6.

В состав повышающего конвертера входят синтезатор частоты с шириной полосы 8 ГГц, управляющий элемент с фильтром низких частот (ФНЧ) на базе прецизионного усилителя семейства AD867, ГУН на базе микросхемы серии HMC510 и повышающий конвертер на 10...16 ГГц.

Синтезатор частот используется для реали-

зации гетеродина в каскаде повышения частоты. Для реализации полнофункционального ФАПЧ, на основе данной микросхемы, используется внешний петлевой фильтр и ГУН. В качестве управляющего элемента в кольце ФАПЧ используется прецизионный усилитель серии AD867. ГУН формирует частоту гетеродина, необходимую для формирования в повышающем конвертере модулированного сигнала на частотах 10700...11700 МГц. В качестве повышающего конвертера используется микросхема серии HMC924. Для получения на входе 1 и входе 2 повышающего конвертера сигналов промежуточной частоты, смещённых по фазе на 90°, применяем фазовращатель, работающий в частотах от 1700 до 2700 МГц.

Усилитель мощности

Усилитель мощности состоит из арсенид-галлиевых усилителей мощности серий FMM5061 и FLM1011. Усилитель мощности построен по каскадной схеме. Функциональная схема усилителя мощности представлена на рис. 7.

Усилитель мощности на входе представляет собой монолитную СВЧ интегральную схему и предназначен для работы в полосе частот 9,5...13,5 ГГц. Коэффициент усиления мощности на 1 дБ составляет 25 дБ. Выходная мощность до 2 Вт (33 дБм). Выходные каскады построены на арсенид-галлиевых (GaAs) усилителях мощности серии FLM1011, предназначенных для работы в полосе частот 10,7...11,7 ГГц. Коэффициент усиления мощ-

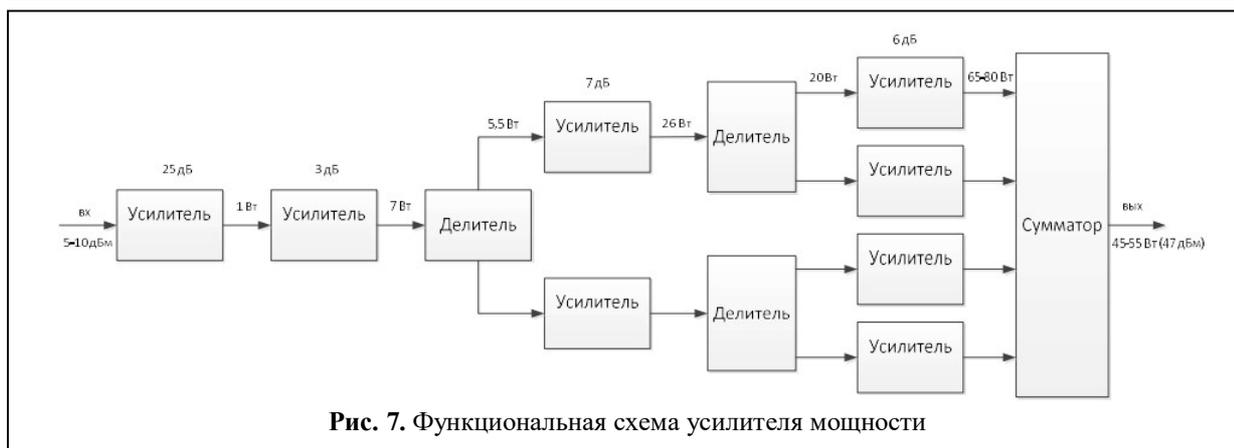


Рис. 7. Функциональная схема усилителя мощности

ности на 1 дБ составляет 7 дБ. Выходная мощность до 15 Вт (42 дБм).

Вторичные источники питания

Для обеспечения базовых элементов аппаратуры для высокоскоростной радиолинии передачи информации с борта КА необходимо использовать вторичные источники питания (ВИП) +12 В и ± 12 В, запитанные от напряжения бортовой сети ± 24 В. Схема питания аппаратуры ВРЛ ПИ представлена на рис. 8.

Ориентировочная потребляемая мощность базовых элементов аппаратуры ВРЛ ПИ составляет 65,35 Вт. Предлагается использование двух типов ВИП: с выходным напряжением

+ 12 В и с выходным напряжением ± 15 В. От ВИП 12 В через импульсные преобразователи запитываются модуль ЦАП, модуль размножения опорной частоты, высокоскоростной квадратурный модулятор и модуль суммирования каналов. Ориентировочное потребления этих элементов составляет 50 Вт. От ВИП ± 15 В запитывается модуль управления и хранения данных и повышающий конвертер.

Потребляемая мощность усилителя мощности составляет 245 Вт при мощности выходного сигнала 30 Вт, 340 Вт при мощности выходного сигнала 40 Вт, 470 Вт при мощности выходного сигнала 50 Вт. Питание усилителя мощности происходит отдельно от бортовой

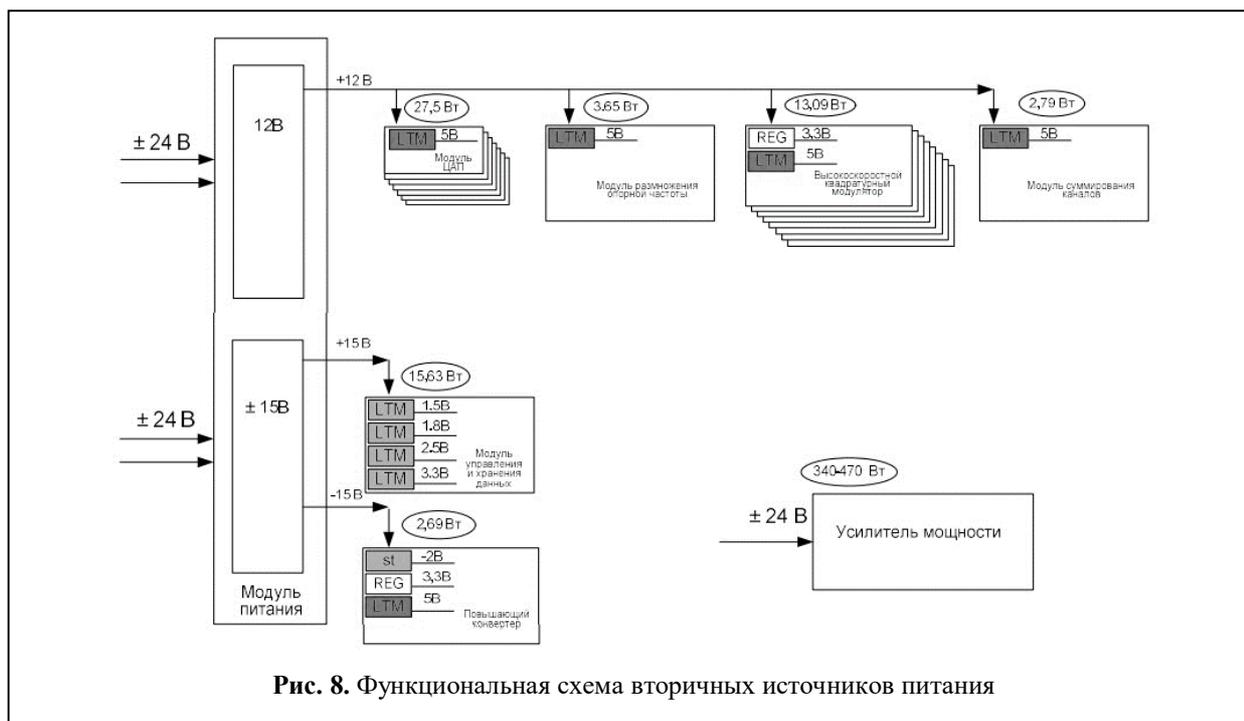


Рис. 8. Функциональная схема вторичных источников питания

сети ± 24 В. Таким образом, потребляемая мощность для одного комплекта аппаратуры ВРЛ ПИ, включая усилитель мощности, составит 310...535 Вт.

Заключение

В ходе работы проведен анализ основных исходных данных на проектирование бортовой аппаратуры для высокоскоростной радиолинии передачи информации с борта КА, анализ требований к составу и назначению базовых элементов БА ВРЛ ПИ. Проведён расчёт энергетических характеристик высокоскоростной радиолинии передачи информации КА — ППИ.

В статье приведена оценка достижимых характеристик аппаратуры в различных диапазонах частот. Для обеспечения выполнения требования к передаче по высокоскоростной радиолинии мониторинговой информации со скоростью 800–1000 Мбит/с предлагается использовать фазоманипулированный сигнал с модуляцией 8PSK на частоте диапазона 10700...11700 МГц, либо 20700...21700 МГц. Преимущество диапазона частот 20700...21700 МГц состоит в его малой используемости потребителями и, как следствие, более мягкими требованиями по электромагнитной совместимости с другими средствами. Но, вследствие малой используемости данного диапазона и отсутствия элементной базы с необходимыми параметрами предлагается использование диапазона частот 10700...11700 ГГц.

Допустимый уровень излучения в сторону Земли ограничен из-за недопустимости излучения в этом направлении мощных сигналов, которые могут создать помехи другим радиотехническим системам. Поэтому целесообразно увеличивать коэффициент усиления антенно-фидерных устройств на передачу за счёт применения зеркальных (двухзеркальных) антенн, либо антенн на основе активных фазированных антенных решёток. Необходимо учесть, что с увеличением частоты сигнала происходит пропорциональное уменьшение ширины диаграммы направленности основного лепестка и при

конструировании системы наведения необходимо обеспечить весьма высокую точность наведения луча антенны.

Для реализации возможности изменения скорости передачи информации в зависимости от энергетического состояния радиолинии и помеховой обстановки предлагается парциальное построение высокоскоростного канала.

В ходе работы определён облик экспериментальных образцов базовых элементов бортовой аппаратуры для высокоскоростной радиолинии передачи информации с борта КА, разработана структурная схема базовых элементов ВРЛ ПИ и принципы её функционирования.

Литература

1. Таблица распределения полос частот между радиослужбами Российской Федерации (утв. Постановлением Правительства РФ от 18 сентября 2019 № 1203-47). Москва. 2019.
2. Recommendation ITU-R P.618-13 «Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems». Geneva. 2017.
3. Recommendation ITU-R P.1057-6 «Probability distributions relevant to radiowave propagation modeling». Geneva, 2019.
4. Андрусенко Ю.А., Котлов М.А., Малов А.А. Расчет канала связи НПУ-БПЛА с учетом реального рельефа местности с использованием имитационной модели // Наука и образование в современном обществе: актуальные вопросы и инновационные исследования : сборник статей II Международной научно-практической конференции, Пенза, 17 января 2021 года. Пенза: «Наука и Просвещение», 2021. С. 37–40.
5. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Статистические характеристики смеси сигнала и аддитивно-мультипликативных помех с негауссовским характером распределения // Радиотехника. 2017. №1. С. 95–102.
6. Охрименко А.А., Крюков Я.В., Покаместов Д.А. Исследование влияния погрешности оценки канала передачи на расчет мощности при уплотнении пользовательских каналов методом PD-NOMA // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. 2019. Т. 1. №1-1. С. 28–30.
7. Еришов А. Н., Березкин В. В., Петров С. В. Экспериментальная отработка комплексов высокоскоростной передачи информации для КА ДЗЗ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018. Т. 5. №4. С. 56–64. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2018.5.4.56.64.

8. Волхонская Е. В., Коротей Е. В., Рушко М. В. Модельная оценка влияния формы созвездия на помехоустойчивость приема радиосигнала QAM-8 в среде Matlab // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. 2018. №3. С. 23–29.

9. Иванова Е. Ю., Фадеев Д. К. Совместное применение неоднородной модуляции и помехоустойчивого кодирования // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2017. Т. 7. №2. С. 89–93.

10. Шеринев К. А., Бахракова М. И. Классификация и исследование моделей ионосферы // Научному прогрессу - творчество молодых : материалы X международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам, Йошкар-Ола, 17–18 апреля 2015 года / Поволжский государственный технологический университет. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2015. С. 84–85.

11. Банников И. М., Салтыков О. В. Цифровое формирование диаграммы направленности антенн СГД // Техника радиосвязи. 2008. № 13. С. 97–112.

12. Якушенко С. А., Забело А. Н., Антонов В. В. Учет особенностей планирования сетей спутниковой связи работающих в Ka/q-диапазонах частот // Colloquium-journal. 2020. № 15-1(67). С. 25–29. DOI:

10.24411/2520-6990-2020-11929.

13. Дубина М. В., Афонин И. Л. Прием служебных сигналов искусственных спутников Земли в Ku-и Ka-диапазонах // 27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2017) : Материалы конференции : В 9 томах, Севастополь, 10–16 сентября 2017 года. – Севастополь: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2017. С. 1723–1728.

14. Анишин М. М., Жбанков Г. А. Расчет поляризационных потерь при планировании радиолиний коротковолнового диапазона (часть 1) // Техника радиосвязи. 2021. № 2(49). С. 42–52. DOI: 10.33286/2075-8693-2021-49-42-52.

15. Васильев С. В., Кащеев Н. А., Кравченко А. С. Методы и результаты синтеза характеристик оперативности обмена информацией между абонентами информационно-управляющих комплексов на основе низкоорбитальных информационных сетей // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 3(15). С. 3–10. DOI: 10.21685/2307-4205-2016-3-1.

16. Герасименко Е. С., Шерстюков С. А. Анализ методики расчета потенциальной помехоустойчивости цифровых демодуляторов при работе с шумовыми помехами // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2022. №2(46). С. 49–57.

Поступила 11 мая 2022 г.

English

ENGINEERING OF CARRIER-BORNE EQUIPMENT FOR HIGH-SPEED RADIO-FREQUENCY LINE OF SPACE INFORMATION TRANSMISSION

Andrey Olegovich Slavyansky — Adviser to the Deputy Director General for Space and Aviation Systems JSC "TSNIRTI named after Academician A. I. Berg"¹.

E-mail: andrey.slavyanskiy@gmail.com

Aleksandr Vasilyevich Shpak — Professor of the Department of Telecommunications of the Institute of Radioelectronics and Informatics MIREA — Russian Technological University².

E-mail: alexandr.shpack@yandex.ru

¹Address: 107078, Russian Federation, Moscow, Novaya Basmannaya st., 20/9.

²Address: 119454, Russian Federation, Moscow, Vernandskogo Ave., 78.

Abstract: Radio-frequency lines used in various space systems are widely known to ensure information transmission speed of several tens of Mbit per second. Parameters of the proposed engineering research including transmission speed, weight and size features and power consumption enable to ensure eventual requirements of space industry in radio-frequency lines, implementing for example, the possibility of prompt transmission of large information from the newest spacecrafts for Earth remote probing to ground points of receiving information. The work objective is to develop carrier-borne equipment low in weight and size for use as part of advanced space system for radar observation of the ground surface. Predictive methods are used for various propagation parameters of radio-frequency signal necessary for planning Space-Earth systems when choosing the optimal range of operating frequencies and the equipment structure. Budget calculation for high-speed radio-frequency line was made according to methods of International Telecommunication Union taking into account additional losses. The article evaluates attainable equipment performance features when operating in various frequency ranges and there were considered the current limitations for signal bandwidth and also power value of radio-frequency line was identified. 8PSK-based phase-shift signal is proposed for use to ensure fulfilling requirements for high-speed radio-frequency line to transmit mon-

itoring information at 800–1000 Mbit/s speed. Partial construction of high-speed channel in 10.7 ... 11.7 GHz frequency range is proposed to ensure possibility to change information transmission speed depending on energy condition of radio-frequency line and interference situation. Properties of the developed carrier-borne equipment of high-speed radio-frequency line with low power consumption (up to 300 W) and weight (up to 80 kg) and, at the same time, with a high integral value of data transmission speed (at least 800 Mbps) enable to make its use as part of small-size spacecrafts in advanced systems for radar surveillance.

Keywords: High-speed radio line, spacecraft, onboard equipment, information reception point, partial signals.

References

1. Table of frequency band distribution between radio services of the Russian Federation (approved By Decree of the Government of the Russian Federation No. 1203-47 dated September 18, 2019). Moscow. 2019.
2. Recommendation ITU-R P.618-13 «Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems». Geneva. 2017.
3. Recommendation ITU-R P.1057-6 «Probability distributions relevant to radiowave propagation modeling». Geneva, 2019.
4. *Andrusenko Yu.A., Kotlov M.A., Malov A.A.* Calculation of the communication channel of the NPU-UAV taking into account the real terrain using a simulation model. Science and education in modern society: Topical issues and innovative research : collection of articles of the II International Scientific and Practical Conference, Penza, January 17, 2021. Penza: "Science and Education", 2021. Pp. 37–40.
5. *Artyushenko V.M., Volovich V.I.* Statistical characteristics of a mixture of a signal and additive-multiplicative interference with a non-Gaussian distribution character. Radiotekhnika [Radioengineering]. 2017. No. 1. Pp. 95–102.
6. *Okhrimenko A. A., Kryukov Ya. V., Pokamestov D. A.* Investigation of the influence of the transmission channel estimation error on the power calculation when compacting user channels by PD-NOMA method. Electronic means and control systems. Materials of the reports of the International Scientific and Practical Conference. 2019. Vol. 1. No. 1-1. Pp. 28–30.
7. *Ershov A.N., Berezkin V.V., Petrov S.V.* Experimental development of high-speed information transmission complexes for remote sensing spacecraft. Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy. 2018. Vol. 5. No. 4. Pp. 56–64.. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2018.5.4.56.64.
8. *Volkhonskaya E. V., Korotey E. V., Grushko M. V.* Model assessment of the influence of the constellation shape on the noise immunity of QAM-8 radio signal reception in Matlab environment. Vestnik Baltiiskogo federalnogo universiteta im I Kanta Seriiia Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskie nauki. 2018. No. 3. Pp. 23–29.
9. *Ivanova E. Yu., Fadeev D. K.* Joint application of inhomogeneous modulation and noise-resistant coding. DSPA Voprosy primeneniia tsifrovoi obrabotki signalov. 2017. Vol. 7. No. 2. Pp. 89–93.
10. *Shershnev K. A., Bastrakova M. I.* Classification and research of ionosphere models. Scientific progress - creativity of the young : materials of the X International Youth Scientific Conference on natural sciences and technical disciplines, Yoshkar-Ola, April 17–18, 2015. Volga State Technological University. Yoshkar-Ola: Volga State Technological University, 2015. Pp. 84–85.
11. *Bannikov I. M., Saltykov O. V.* Digital formation of the directional pattern of SRS antennas. Tekhnika radiosviazi . 2008. No. 13. Pp. 97–112.
12. *Yakushenko S. A., Zabello A. N., Antonov V. V.* Taking into account the features of planning satellite communication networks operating in Ka/q frequency bands. Colloquium-journal. 2020. No. 15-1(67). Pp. 25–29. DOI: 10.24411/2520-6990-2020-11929.
13. *Dubina M.V., Afonin I.L.* Reception of service signals of artificial Earth satellites in Ku- and Ka-bands // 27th International Crimean Conference "Microwave technology and telecommunication technologies" (KryMiKo'2017): Conference proceedings : In 9 volumes, Sevastopol, September 10-16, 2017. Sevastopol: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University", 2017. Pp. 1723–1728.
14. *Anishin M. M., Zbankov G. A.* Calculation of polarization losses when planning short-wave radio lines (Part 1). Tekhnika radiosviazi. 2021. No. 2(49). Pp. 42–52. DOI: 10.33286/2075-8693-2021-49-42-52.
15. *Vasiliev S. V., Kashcheev N. A., Kravchenko A. S.* Methods and results synthesis of characteristics of the efficiency of information exchange between subscribers of information management complexes based on low-orbit information networks. Nadezhnost i kachestvo slozhnykh system. 2016. No. 3(15). Pp. 3–10. DOI: 10.21685/2307-4205-2016-3-1.
16. *Gerasimenko E.S., Sherstyukov S.A.* Analysis of the methodology for calculating the potential noise immunity of digital demodulators when working with noise interference. Radioengineering and telecommunication systems. 2022. No. 2(46). Pp. 49–57.