УДК 629.78

Описательная модель системы спутниковой связи MUOS

Макаренко С. И.

Актуальность. *Обеспечение услугами связи подразделений, защищающих интересы России за ее пределами, требуют создания спутниковых систем связи (ССС) специального назначения, обладающих глобальной зоной покрытия Земли. В настоящее время в России разрабатывается несколько таких проектов. При этом обоснование технических решений для этих ССС требует формирования исходных данных для моделирования различных вариантов организации связи. Для формирования таких исходных данных может быть использована другая технологически развитая ССС, обеспечивающая глобальную связь для мобильных подразделений вооруженных сил США – Mobile User Object System (MUOS), которая может рассматриваться как прототип отечественной ССС специального назначения.* ***Целью работы*** *является формирование описательной модели ССС MUOS. Данная описательная модель может использоваться для разработки исходных данных при моделировании связных процессов в отечественных ССС в интересах научно-обоснованного выбора принципов организации связи в них. Для разработки описательной модели ССС MUOS были использованы только открытые источники.* ***Результаты и их новизна.*** *Элементом практической новизны работы являются выявленные общие технологические особенности построения и используемые технологические решения в ССС специального назначения на примере системы MUOS. В частности, описаны общие закономерности формирования орбитальной группировки, принципы каналообразования в линиях «вверх» и «вниз», варианты совместного использования нового и «унаследованного» каналообразующего оборудования, а также использование различных технологических решений для повышения развед- и помехозащищенности связи.* ***Практическая значимость.*** *Представленная в работе описательная модель будет полезна техническим специалистам для обоснования новых технологических решений для отечественных ССС специального назначения. Кроме того, данная модель будет полезна научным работникам и соискателям, ведущим научные исследования в области спутниковой связи.*

Ключевые слова: *модель, описательная модель, система спутниковой связи, система подвижной спутниковой связи, Mobile User Object System, MUOS.*

Введение

Обеспечение услугами связи частей и подразделений, обеспечивающих защиту интересов Российской Федерации (РФ) за ее пределами, требует создания спутниковых систем связи (ССС) специального назначения. В настоящее время в России разрабатывается несколько таких проектов: «ЕССС-3», «Благовест» и др. При этом формирование связных услуг на этапе проектирования конкретных средств связи ССС требует проведения предварительного моделирования и расчетов с целью формирования облика технических средств. Так, одной из наиболее технологически развитых ССС специального назначения является система Mobile User Object System (MUOS), эксплуатируемая в интересах вооруженных сил (ВС) США. Таким образом, в интересах формирования исходных данных для моделирования вариантов организации связи в перспек-

Библиографическая ссылка на статью:
Макаренко С. И. Описательная модель системы спутниковой связи MUOS // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 89-116. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10306.

Reference for citation:
Makarenko S. I. Descriptive Model of MUOS satellite communication system. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 3, pp. 89-116. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10306 (in Russian).

тивных отечественных ССС специального назначения, а также технологических решений при создании соответствующих космических аппаратов (КА) связи, в статье предложена описательная модель ССС MUOS, как наиболее технически развитого прототипа. Описательная модель сформирована на основе информации, представленной в англоязычных научных статьях [1-14, 36], а также путем обобщения данных, представленных в отечественных работах [15-21, 37, 38].

Назначение описательной модели – предоставление исходных данных для моделирования связных процессов как в ССС MUOS, так и в перспективных отечественных геостационарных ССС, прототипом которых может служить ССС MUOS.

По своей сути, данная работа продолжает цикл публикаций автора [22-25], посвященных формированию описательных моделей систем связи специального назначения [22, 23], а также описательных моделей ССС [24, 25].

Материал статьи был декомпозирован на ряд подразделов.

1. Назначение и состав ССС MUOS.
2. Организация связи в ССС MUOS.
   2.1. Краткая характеристика бортового связного оборудования КА MUOS.
   2.2. Частотный план КА MUOS.
   2.3. Особенности организации широкополосной связи комплектом «нового» оборудования КА MUOS.
   2.4. Особенности организации узкополосной связи комплектом «старого» оборудования КА MUOS.
   2.5. Особенности организации связи в фидерных линиях КА MUOS.
3. Наземные средства спутниковой связи ССС MUOS.
   3.1. Абонентские терминалы.
   3.2. Средства связи шлюзовых станций.
4. Сведения о полярном дополнении ССС MUOS на основе экспериментального КА TacSat-4.

1. Назначение и состав ССС MUOS

Система MUOS создавалась для ВС США в интересах предоставления мобильным пользователям, представляющим различные звенья управления от стратегического до тактического, телефонной связи, услуг по передаче данных и видео в реальном масштабе времени [15]. Данная система ориентирована на совместное применение с абонентскими терминалами (АТ) системы JTRS (Joint Tactical Radio Systems) [13]. Важнейшими требованиями, предъявляемыми к ССС MUOS являются: обеспечение гарантированного доступа к услугам связи, связь в движении, способность формировать различные по назначению и конфигурации сети связи, объединённое взаимодействие сетей связи разнородных сил, глобальный охват поверхности Земли, режим вещания и связь в приполярных районах Арктики, возможность использования малогабаритных портативных АТ.

ССС MUOS должна заменить устаревающие ССС FLTSATCOM и UFO, сохранив вместе с тем обратную совместимость с ними и со старым парком

наземного оборудования спутниковой связи, работающего с этими ССС. В настоящее время именно ССС MUOS является основной системой тактической мобильной связи ВС США в УВЧ диапазоне (в западной классификации – P- или UHF-диапазон) [15-17].

Основными пользователями ССС MUOS являются органы военного управления и подразделения тактического звена вплоть до отдельного военнослужащего. Ресурсы данной ССС плотно интегрированы и совместно используются с наземной сетью тактического звена JTRS. Кроме того, ССС MUOS обеспечивает управление беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) и ретрансляцию формируемых ими данных, а также передачу полетных заданий и целеуказаний крылатым ракетам, например, таким как ракеты морского базирования Tomahawk. В настоящее время в ВС США уже имеется около 100 тыс. спутниковых АТ, поддерживающих режимы широкополосной передачи данных, впервые реализованных в ССС MUOS. До 2025 г. ВС США планирует закупить еще более 270 тыс. таких АТ. Это позволит увеличить число одновременно обслуживаемых АТ с 1 тыс. до 126,5 тыс. штук [15-17].

Заказ на проектирование ССС MUOS командование Военно-воздушных сил (ВВС) США выдало в сентябре 2002 г. компаниям Lockheed Martin и Raytheon Satellite Communications Systems. Для космических аппаратов (КА) MUOS в соответствии с заявкой ВС США были зарезервированы 11 точек стояния на геостационарной орбите (ГСО) – 15,5°, 22,5°, 100°, 105°, 145°, 177° западной долготы и 29°, 72°, 75°, 125°, 172° восточной долготы [15].

ССС MUOS была введена в опытную эксплуатацию в 2012 г, а с 2017 г. перешла в режим штатной эксплуатации. Также в 2017 г. компания Lockheed Martin заключила контракт с ВС США на техническое обслуживание и дальнейшую модернизацию ССС MUOS на период до 2020 г. Общие расходы на развертывание и эксплуатацию ССС MUOS в период 2004-2020 гг. оцениваются в 7,3 млрд долл. [15].

На середину 2019 г. орбитальная группировка (ОГ) MUOS включает 5 КА (из них 4 КА – активны и используются, КА MUOS-5 – резервный) на ГСО, а также экспериментальный КА TacSat-4 на эллиптической орбите с апогеем 12074 км в районе северного полюса Земли. Существующая ОГ MUOS была развернута в период 2012-2015 гг. (таблица 1, рис. 1) [15-17].

Таблица 1 – Орбитальная группировка ССС MUOS
по состоянию на середину 2019 г. [15-17]

КА	Точка стояния на ГСО	Наклонение орбиты	Дата запуска
TacSat-4	Эллиптическая орбита с апогеем 12074,8 км в районе северного полюса Земли. Перигей – 674,7 км, апогей – 12755 км. Период обращения КА – 238,9 мин	63,4°	27.09.2011
MUOS-1	177° з.д.	4,7°	24.02.2012
MUOS-2	99,9° з.д.	3,8°	19.07.2013
MUOS-3	15,5° з.д.	4,3°	21.01.2015
MUOS-4	75° в.д.	4,5°	02.09.2015
MUOS-5	104,4° з.д.	9,9°	24.06.2016

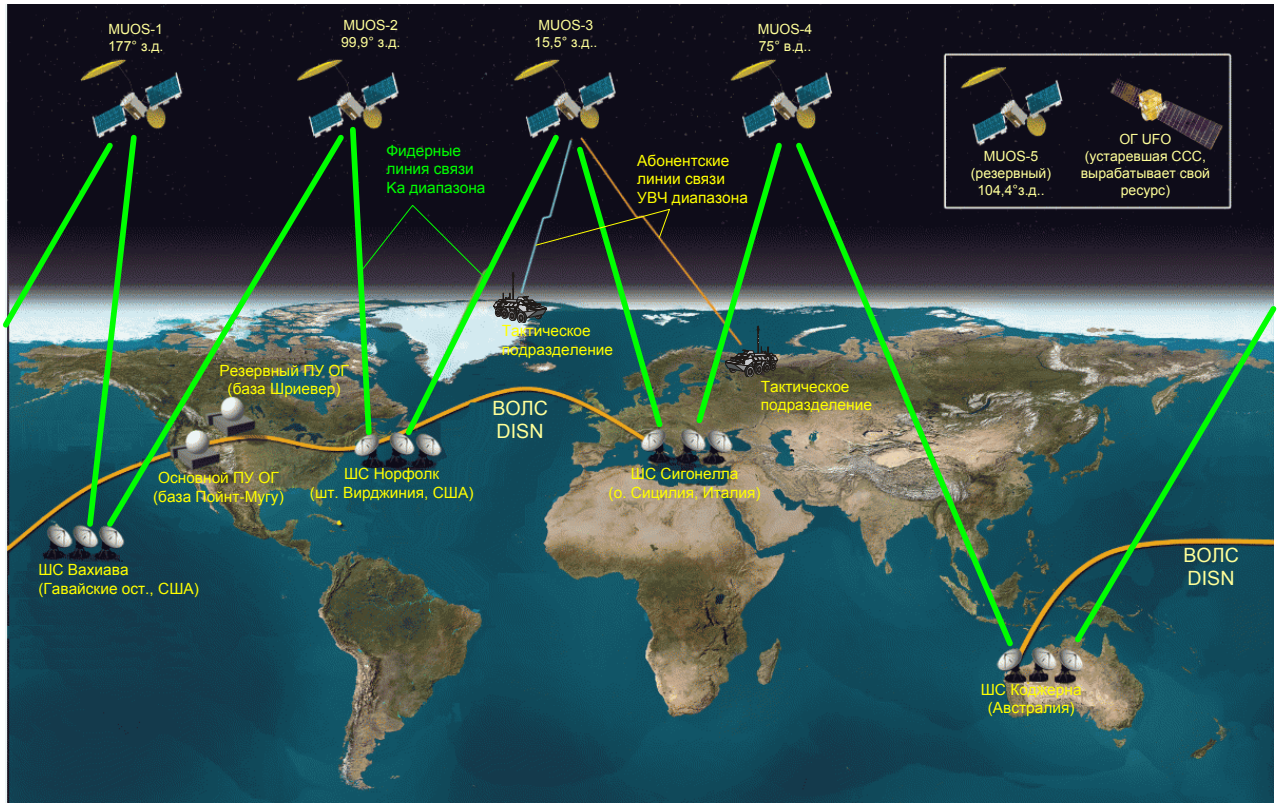

Рис. 1. Структура и состав ССС MUOS [1]

Срок планируемого активного существования каждого КА MUOS – 17 лет. Так как резервный КА MUOS-5 в процессе запуска по причине нештатной работы собственного двигателя израсходовал значительную часть своего топлива, то в связи с этим срок его активного будет существенно ниже [15].

В соответствии с планами ВС США предусмотрено создание 3-х дополнительных КА MUOS, которые в целях поддержания ОГ из 4-х активно функционирующих КА будут по мере надобности заменять существующие КА. Разработку КА MUOS-6 для замены КА MUOS-1 предполагается начать в 2021 г., а к 2026 г. – обеспечить его готовность к запуску [15-17].

В наземном сегменте ССС MUOS созданы 4-е шлюзовых станции (ШС), которые предназначены для стыковки фидерных линий связи «КА – ШС» с наземной сетью ВС США DISN (Defense Information System Network) и наземными IP-сетями. ШС размещены на Вахиаве (Гавайские острова, США), в Норсвесте (шт. Вирджиния, США), в Коджерне (западная Австралия) и в Нисцеми (о. Сицилия, Италия). Каждая ШС оснащена тремя антеннами с диаметрами параболических зеркал по 18,4 м. Каждый КА виден с позиций 2-х ШС и связан с ними посредством фидерных линий [1].

Кроме ШС в наземный сегмент ССС MUOS входит пункт управления (ПУ) радиоресурсом ССС, размещенный на Вахиаве (Гавайские острова, США), а также основной и резервный ПУ ОГ, расположенные на базе ВМС США Пойнт-Мугу (шт. Калифорния, США) и базе ВВС США Шриевер (шт. Колорадо, США), соответственно. ПУ радиоресурсом ССС обеспечивает частотное планирование радиоресурса, приоритизацию АТ, предоставление ресурсов ССС абонентам по требованию в соответствии с технологией DAMA

(Demand Assigned Multiple Access), а также управление потоками трафика в ССС в режиме реального времени. ПУ ОГ обеспечивают непрерывный мониторинг состояния КА, работоспособность их бортовых систем, формируют и передают на КА команды управления [1].

КА MUOS разработаны на основе платформы A2100 компании Lockheed Martin. Внешний вид и назначение отдельных элементов КА MUOS представлены на рис. 2. Для получения дополнительной информации можно обратиться к работам [1, 2] в которых подробно рассмотрено обоснование различных технических решений при проектировании КА MUOS – выбор антенной системы, используемых сигнально-кодовых конструкций, технологии обслуживания АТ, архитектуры бортового комплекса связи и т.д.

Отличительной особенностью ССС MUOS является то, что она создана с применением передовых коммерческих технологий спутниковой связи, что значительно улучшает ее возможности в части оказания услуг высокоскоростной широкополосной связи.

Рис. 2. Внешний вид и назначение отдельных элементов КА MUOS [2]

2. Организация связи в ССС MUOS

2.1. Краткая характеристика бортового связного оборудования КА MUOS

Бортовая аппаратура связи КА MUOS в УВЧ диапазоне включает оборудование 2-х типов [1, 15]:

1) «новое» оборудование, которое использует стандарт спектрально-адаптивного широкополосного многостанционного доступа с кодовым разделением SA-WCDMA (Spectrally Adaptive Wideband Code Division Multiple Access), который, в свою очередь, с незначительными модификациями соответствует коммерческому стандарту WCDMA для се-

тей мобильной связи 3G, разработанному консорциумом 3GPP (Third Generation Partnership Project);

2) «старое» оборудование для предоставления каналов абонентам по требованию в соответствии с технологий DAMA в режиме их частотно-временного разделения MF-TDMA (Multi-Frequency Time-Division Multiple Access). Данное оборудование и режима его работы аналогичны установленному на КА типа FLTSATCOM и UFO.

Антенная система КА MUOS включает в себя:

- антенну диаметром 13,8 м и комплект из 16 излучателей, которые формируют 16 узких лучей в УВЧ диапазоне с шириной диаграммы направленности луча 4-5 град и коэффициентом усиления в луче порядка 28-30 дБ. В каждом из лучей формируется 4-е широкополосных WCDMA-сигнала с полосой по 5 МГц, с которыми работает «новое» оборудование КА MUOS;
- антенну диаметром 5,3 м, которая формирует 1 луч земного охвата в УВЧ диапазоне, в котором передаются узкополосные сигналы с полосами частот по 5 и 25 кГц с ЭИИМ для канала 5 кГц – порядка 16-17 дБВт, а для канала 25 кГц – 22-25 дБВт. Данная антенна предназначена для работы «старого» оборудования КА MUOS;
- 2 дисковые антенны на карданном подвесе для обеспечения связи КА с ШС по фидерным линиям в Ка диапазоне;
- антенну S диапазона, для приема/передачи телеметрической информации и управления КА.

На рис. 3 показана конфигурация зон покрытия 16-ю узкими лучами, создаваемых большой антенной диаметром 13,8 м и комплектом «нового» оборудования КА MUOS [15].

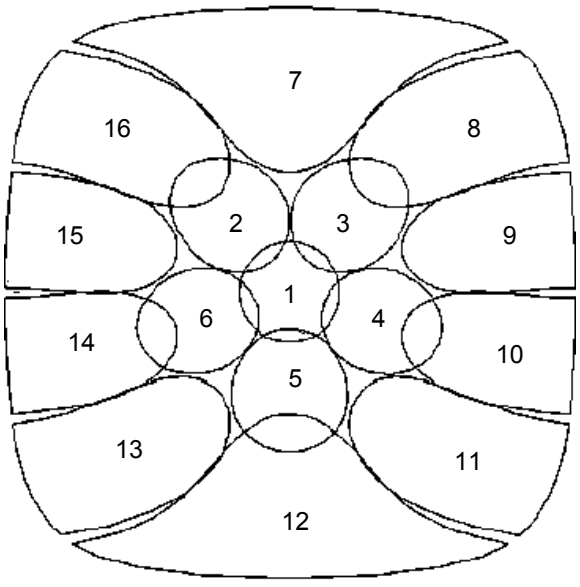

Рис. 3. Конфигурация зон покрытия 16-ю узкими лучами, создаваемых большой антенной диаметром 13,8 м и комплектом «нового» оборудования КА MUOS [15]

На рис. 4 показана зона покрытия всей ССС MUOS с указанием лучей земного охвата и 16 узких лучей каждого КА. Данная ССС обеспечивает уверенный прием и передачу данных в точках с широтой от 65° ю.ш. до 65° с.ш. Особенностью зоны охвата ССС MUOS является то, что практически 70% земной поверхности оказывается в зоне одновременной видимости 2-х КА. Это позволяет АТ гибко выбирать КА, который будет их обслуживать, а группе управления – адаптивно перераспределять потоки трафика пользователей между спутниками. На рис. 4 также обозначены театры военных действий (ТВД), которые рассматриваются экспертами США как потенциальные для их ВС. Отметим, что резервный КА MUOS-5 размещенный в точке стояния 104,4° з.д. фактически резервирует КА MUOS-2 (99,9° з.д.), размещенный над территорией США [1, 15].

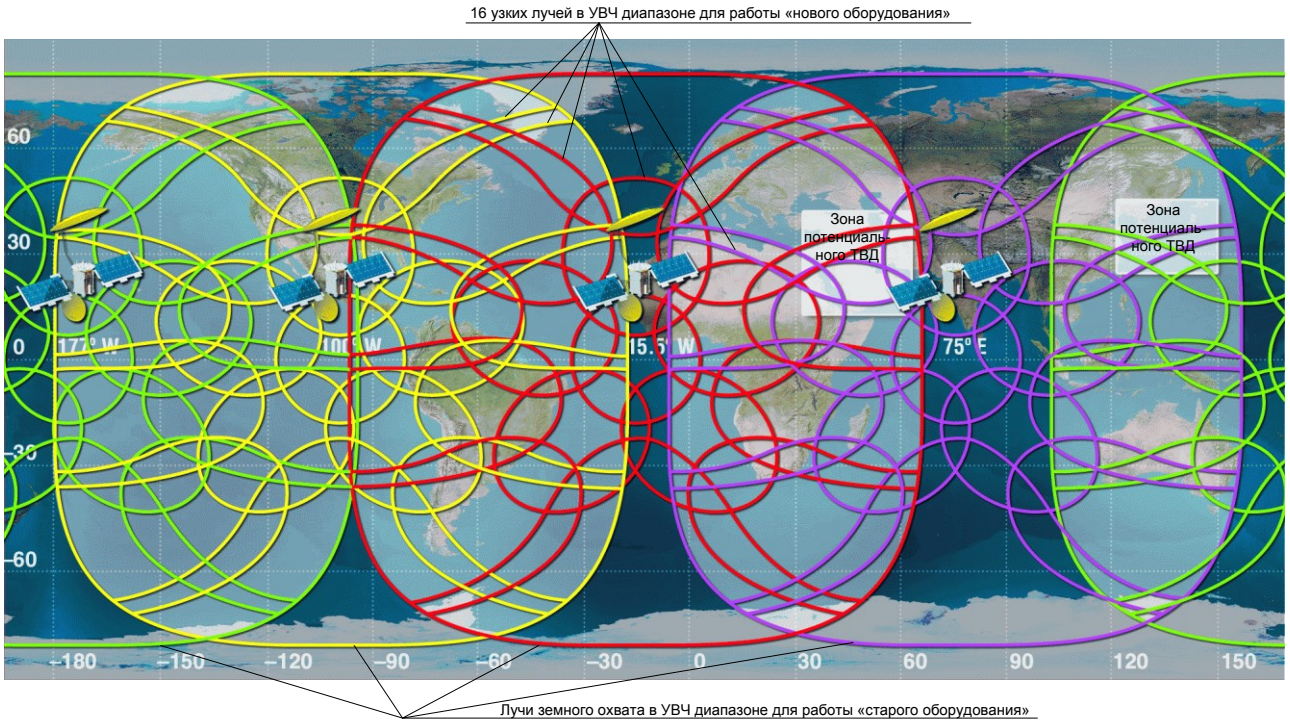

Рис. 4. Зона покрытия ССС MUOS [1]

КА MUOS работают в УВЧ (P диапазон), S и Ka диапазонах. Бортовой комплекс связи КА MUOS обеспечивает суммарную скорость широкополосных линий связи до 5 Мбит/с, что в 10 раз выше, чем у ССС UFO (до 400 кбит/с). Каждый КА MUOS обладает пропускной способностью, эквивалентной 8-ми КА UFO [17].

Предполагаемая схема бортового комплекса связи КА MUOS представлена на рис. 5.

Основные ТТХ бортового комплекса связи ССС MUOS [1, 15]:

- канальная скорость передачи данных одним АТ – в направлении «АТ – КА» до 64 кбит/с, в направлении «КА – АТ» – до 384 кбит/с;
- виды связи: телефония, видеосвязь, передача данных;
- абонентские линии: УВЧ диапазон (P диапазон) – 292-320 / 244-270, 360-380 МГц;

- фидерные линии: Ка-диапазон – 30-31 / 20,2-21,2 ГГц;
- формирование «новым» оборудованием 4-х широкополосных сигналов с шириной полосы 5 МГц;
- формирование «старым» оборудованием узкополосных сигналов с шириной полосы 5 и 25 кГц;
- стандарт работы «нового» оборудования – спектрально-адаптивный широкополосный многостанционный доступ с кодовым разделением (SA-WCDMA) по коммерческой технологии 3G сетей мобильной связи;
- стандарт работы «старого» оборудования – предоставление каналов по требованию в соответствии с технологий DAMA в режиме частотно-временного разделения абонентов MF-TDMA;
- маршрутизация и управление связью – осуществляется на ПУ и ШС, на основе коммерческого стандарта мобильной связи UMTS.

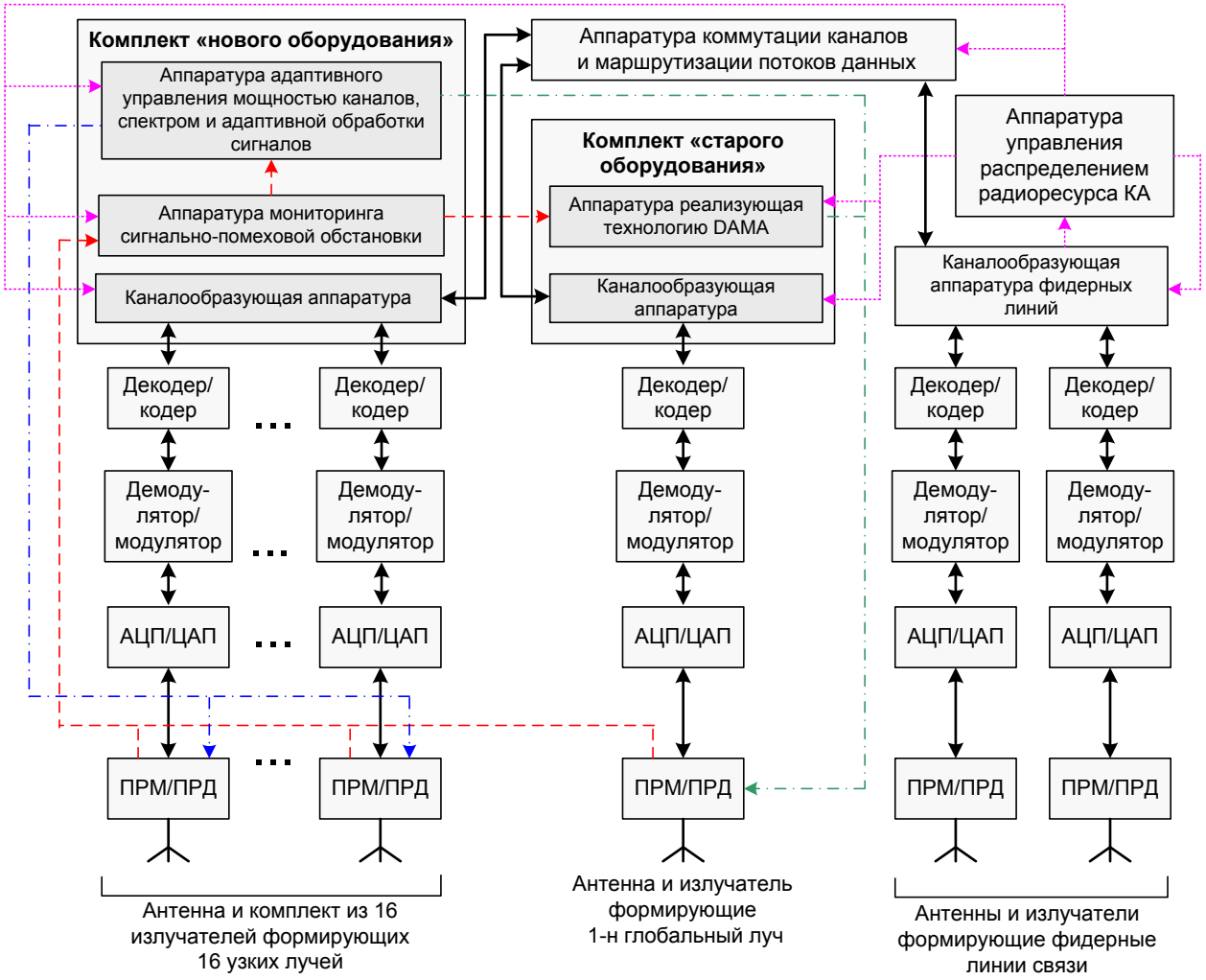

Рис. 5. Предполагаемая схема бортового комплекса связи КА MUOS [2]

Таблица 2 – Характеристики связного оборудования КА MUOS

Параметр	Значение
Используемые частоты «вверх»/«вниз»:	
УВЧ диапазон (P диапазон)	292-320 / 244-270, 360-380 МГц
Ka диапазон	30-31 / 20,2-21,2 ГГц
S диапазон	1,75-1,85 / 2,2-2,29 ГГц*
Ширина полосы частот отдельной линии связи:	
Абонентская линия «нового» оборудования	5 МГц (4 канала)
Абонентская линия «старого» оборудования	5 кГц (21 каналов) 25 кГц (18 каналов)
Фидерная линия	1 ГГц
Антенная система:	
«Новое» оборудование УВЧ диапазона	1 многолучевая антенна диаметром 13,8 м с 16-элементным облучателем, который формирует 16 узких лучей с шириной диаграммы направленности луча 4-5 град и коэффициентом усиления в луче 28-30 дБ
«Старое» оборудование УВЧ диапазона	1 антенна диаметром 5,3 м формирующая 1 луч земного охвата и 39-канальным облучателем на 18 каналов по 25 кГц и 21 канал на 5 кГц
Ka диапазон	2 дисковые антенны на карданном подвесе для обеспечения связи с ШС по фидерным линиям
S диапазон	1 антенна для получения телеметрической информации и управления КА
Мощность передатчика:	
«Новое» оборудование УВЧ диапазона	н/д
«Старое» оборудование УВЧ диапазона	10 Вт (для канала 5 кГц) 40-60 Вт (для канала 25 кГц)
Ka диапазон	н/д
S диапазон	н/д
ЭИИМ:	
«Новое» оборудование УВЧ диапазона	н/д
«Старое» оборудование УВЧ диапазона	16-17 дБВт (для канала 5 кГц) 22-25 дБВт (для канала 25 кГц)
Ka диапазон	н/д
S диапазон	н/д
Скорости передачи данных в абонентской линии:	
для одного АТ с использованием «нового» оборудования	2,4-384 кбит/с
для одного АТ с использованием «старого» оборудования	0,075-16 кбит/с
в одном в одном WCDMA-канале «нового» оборудования	до 1,2 Мбит/с
во всех каналах «нового» оборудования	до 5 Мбит/с
во всех каналах «старого» оборудования	до 1,02 Мбит/с
Суммарное количество стандартных абонентских линий КА	4189 стандартных каналов с пропускной способностью 2,4 Кбит/с
Суммарная пропускная способность всех абонентских линий КА	10 Мбит/с
Мощность системы питания	13,1 кВт

Примечания:
* – данные требуют уточнения;
н/д – нет данных.

№3. 2019
ISSN 2410-9916

При установлении связи «АТ – АТ» в ССС MUOS, данные от АТ-источника передаются по линии «вверх» на КА, который коммутирует их в фидерную линию «вниз» и отправляет их на ШС. Далее ШС передает данные в наземную сеть DISN, по которой они передаются той ШС, которая имеет в прямой видимости КА, к которому подключен АТ-получатель. После этого ШС пересылает данные по фидерной линии «вверх» на КА, а тот перекоммутирует их в линию связи «вниз» к АТ-получателю. Если АТ-источник и АТ-получатель обсуживаются одним и тем же КА, то они коммутируются на борту КА без задействования ШС [1].

Требования к устойчивости ССС MUOS, предъявляемые ВС США – обеспечение коэффициента готовности не менее 0,97 [1].

2.2. Частотный план КА MUOS

Частотный план КА MUOS для абонентских линий связи в УВЧ диапазоне представлен на рис. 6. Данный частотный план включает участки спектра, выделенные для работы оборудования обоих типов: для «нового» оборудования – 300-320 МГц по линии «вверх» и 360-380 МГц по линии «вниз», для «старого» оборудования – 292-318 МГц и 244-270 МГц соответственно. Кроме того, два участка спектра (280-300 МГц – «вверх» и 340-360 МГц – «вниз») зарезервированы для использования в аппаратуре связи следующего поколения. Частичное перекрытие участков спектра по линии «вверх» не снижает их электромагнитной совместимости (ЭМС), так как «старое» и «новое» оборудование используют различные виды радиосигналов [1].

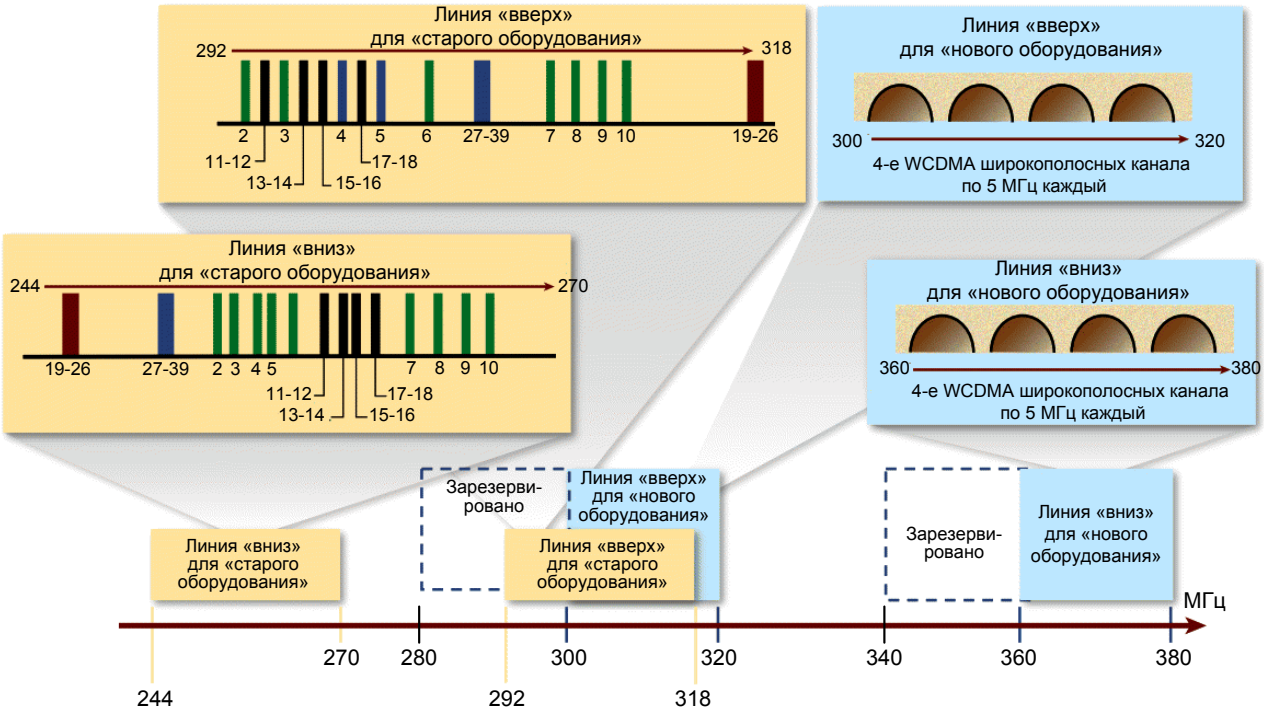

Рис. 6. Частотный план КА MUOS в УВЧ диапазоне [1]

DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10306
URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2019-03/06-Makarenko.pdf

Частотный план КА MUOS для фидерных линий связи в Ка диапазоне соответствует 30-31 ГГц – для линии «вверх» и 20,2-21,2 ГГц – для линии «вниз» [8].

Для управления КА на этапе орбитальных испытаний используется линия связи в S диапазоне, а затем – четвертая группа каналов фидерной линии в Ка диапазоне 30-30,5 / 20,2-20,7 ГГц (при круговой поляризации левого вращения).

2.3. Особенности организации широкополосной связи комплектом «нового оборудования» КА MUOS

Ширина спектра излучений «нового» оборудования в УВЧ диапазоне составляет 20 МГц. В этой полосе формируются 4 широкополосных WCDMA-канала с шириной полосы по 5 МГц. Сигналы формируются в соответствии с коммерческим стандартом WCDMA разработанным группой 3GPP для сетей связи 3G. В каждом из WCDMA-каналов за счет использования уникальных псевдослучайных последовательностей (ПСП) в режиме кодового уплотнения обеспечивается до 500 подканалов со скоростями 2,4 кбит/с. Подканалы всех 4-х WCDMA-каналов в каждом луче формируют тот радиоресурс, который перераспределяется между АТ, находящимися в зоне покрытия конкретного луча. При этом реальное количество обслуживаемых АТ определяется требуемыми для них скоростями передачи данных и типами АТ. Таким образом, теоретически возможная максимальная пропускная способность одного широкополосного WCDMA-канала, который соответствует WCDMA-сигналу, составляет 1,2 Мбит/с [1].

Максимальная пропускная способность «нового» оборудования всех 4-х КА в составе ССС MUOS составляет 39,2 Мбит/с, что соответствует 16332 одновременно используемым подканалам со скоростью 2,4 кбит/с. Таким образом, при равномерной загрузке всех КА, максимальная пропуская способность «нового» оборудования одного КА составляет около 10 Мбит/с (4083 одновременно используемых подканалов со скоростью 2,4 кбит/с) [1].

При формировании WCDMA-канала используются сигналы QPSK или 8PSK, а для кодирования – турбо код с постоянной скоростью кодирования $R = 0{,}711$ [6, 7, 11]. Каждый WCDMA-канал содержит в себе две группы подканалов с кодовым мультиплексированием на основе уникальных ПСП:

1) группа подканалов DPDCH (Dedicated Physical Data Channel), которая содержит абонентские подканалы с полезной нагрузкой абонентов – до 500 подканалов со скоростями 2,4 кбит/с;
2) подканал DPCCH (Dedicated Physical Control Channel), который содержит служебную информацию, передаваемую в направлении «КА – АТ».

Передаваемые в WCDMA-канале подканалы во временной области организованны в виде кадров по 10 мс, при этом каждый кадр подразделяется на 15 тайм-слотов, каждый из которых имеет длительность 2/3 мс. При этом, каждый тайм-слот содержит 10 символов DPCCH-канала (коэффициент расширения спектра равен 256), 6 из которых являются служебными пилот-сигналами. Помимо использования турбо кодирования в конце каждого тайм-слота добавля-

ется контрольная сумма CRC (Cyclic Redundancy Check), которая занимает размер менее 1% от размера тайм-слота [10, 11].

Широкополосные сигналы (ШПС) WCDMA-каналов позволяют использовать УВЧ диапазон 300-318 МГц совместно с узкополосными сигналами «старого» оборудования (рис. 6). Кроме того, этот диапазон насыщен излучениями других радиоэлектронных средств (РЭС) и использование ШПС позволит повысить ЭМС и достоверность приема сигналов. При формировании и приеме сигналов WCDMA-каналов учитывается возможность их частичного перекрытия другими узкополосными сигналами более высокой мощности (например, теми же узкополосными сигналами «старого» оборудования ССС MUOS), а также необходимость помехозащиты от преднамеренных помех.

В работе [2] показано, что при обосновании облика КА MUOS на этапе технического проектирования специалистами предлагалось перейти от фиксированных сигналов вида MPSK (BPSK, QPSK и 8PSK) к использованию технологии адаптивного изменения типа сигнала и скорости кодирования турбо-кода в каждом WCDMA-сигнале каждого луча в интересах достижения максимально возможной скорости передачи при текущем значении отношения сигнал/шум (ОСШ). Предлагаемый в [2] вариант такого адаптивного управления сигнально-кодовой конструкцией представлен на рис. 7. В частности, рассматривались сигналы GMSK, CPFSK, 8PSK, 16QAM, 32QAM, 64QAM, и скорости кодирования R = 1/2, 1/3, 2/3, 3/4, 4/5 и 5/6. Также альтернативный вариант адаптивного кодирования для абонентских каналов ССС MUOS описан в работе [11]. Технология адаптивного выбора сигнально-кодовой конструкции широко используется в стандартах спутниковой связи DVB-S (Digital Video Broadcasting – Satellite) и действительно обеспечивает существенный прирост скорости передачи в каналах при условии хорошей сигнально-помеховой обстановки [26]. Возможно, такие варианты адаптивного выбора сигнала и кодирования будут использованы при дальнейших модернизациях ССС MUOS.

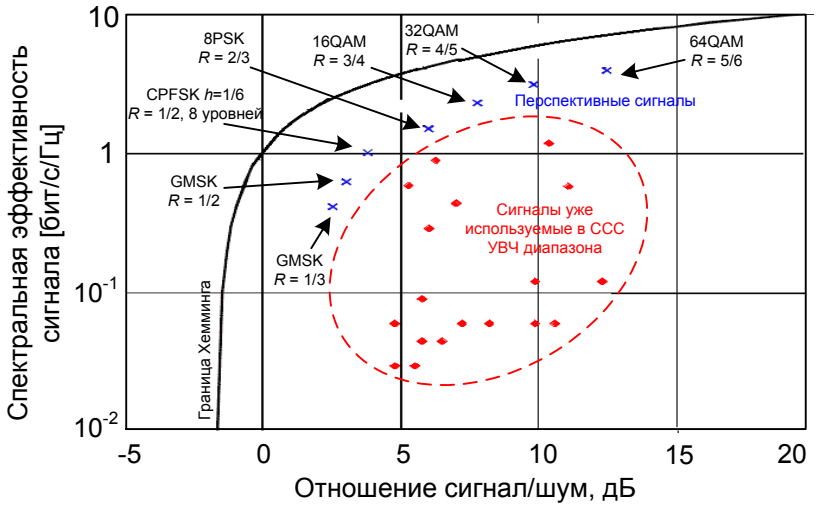

Рис. 7. Предложения по использованию технологии адаптивного изменения типа сигнала и скорости кодирования турбо-кода в каждом WCDMA-сигнале каждого луча КА MUOS [2]

«Новое» каналообразующее оборудование КА формируя и обрабатывая WCDMA-каналы использует технологию управления мощностью и спектром передаваемых сигналов, а также технологию адаптивной обработки сигналов. Данные технологии замкнуты в единый управляющий контур с обратной связью с АТ, что позволяет каналообразующей аппаратуре КА в режиме реального времени контролировать сигнально-помеховую обстановку и при необходимости перераспределять полосы используемых частот в интересах наилучшего обслуживания АТ, а также блокировать частоты, пораженные помехами [1].

Использование технологии управления мощностью и спектром позволяет не только управлять мощностью излучаемых и ретранслируемых через КА сигналов, повышая ее в случаях, когда необходимо компенсировать слабый прием/передачу АТ, но и позволяет «вырезать» из формируемых ШПС те участки спектра, которые не должны использоваться в данном луче по причине необходимости обеспечения ЭМС с другими РЭС или в связи с действиями в конкретных странах лицензионных запретов на использование тех или иных частот. Технология адаптивной обработки сигналов ориентирована на оценку текущей сигнально-помеховой обстановки и адаптивную регулировку чувствительности приемников сигналов. Кроме того, данная технология с помощью фильтрации позволяет блокировать те участки спектра, в которых ведется прием узкополосных сигналов «старого» оборудования КА, или те участки спектра, в которых фиксируется воздействие сосредоточенной по частоте помех. Из каждого WCDMA-канала с полосой 5 МГц могут безболезненно блокироваться до несколько сотен килогерц [1]. Подробное исследование помехоустойчивости WCDMA-каналов при блокировке в нем узкополосных участков спектра представлено в работе [7].

В целом, используемые в «новом» оборудовании КА MUOS технологии соответствуют аналогичным технологиям, используемым базовыми станциями сетей 3G работающих по стандарту WCDMA. Данный стандарт описан в работе [27]. Принципиальными отличиями ССС MUOS от земных сетей, работающих по стандарту 3G WCDMA является [1]:

- адаптация технологий WCDMA к большим задержкам в распространении сигналов (свыше 640 мс);
- долгосрочная оценка с темпом 10 мс и прогнозирование ОСШ в линиях связи «вверх»/«вниз», а также ошибок в кадрах передаваемых данных (длительность кадра 10 мс) и заблаговременное изменение параметров технологии управления мощностью и спектром передаваемых сигналов, а также технологии адаптивной обработки сигналов с учетом сделанного прогноза и длительности распространения сигнала;
- использование технологии передачи данных «точка-многоточка» и «многоточка-многоточка», которая позволяет формировать из доступных подканалов каждого КА виртуальные сети, в которых АТ обмениваются данными между собой за одну ретрансляцию через КА (без передачи данных на ШС), а также адаптивное изменение мощности ре-

транслируемых сигналов для АТ в составе виртуальных сетей, которые находятся в зонах, характеризующихся слабым приемом сигналов;
- использование технологии «хэндовер» для передачи мобильных АТ из одного луча КА в другой при их движении без прерывания связи;
- использование IP-технологии (IPv4 и IPv6) как базовой технологии сетевого уровня для ССС, что обеспечивает бесшовную стыковку виртуальных сетей, развернутых в рамках ССС MUOS, с другими наземными IP-сетями ВС США, такими как DISN, NIPRNET и SIPRNET;
- использование протокола маршрутизации OSPF, входящего в стек IP-протоколов, для нахождения кратчайшего пути передачи данных для абонентов ССС [12];
- обеспечение защищенности абонентских каналов за счет возможности перераспределения подканалов между АТ с периодичностью от 640 мс, а также за счет шифрования всех передаваемых АТ данных путем использования протокола HAIPE (High Assurance IP Encryptor) или специального устройства шифрования, устанавливаемого на АТ ВС США и работающего по протоколу SCIP (Secure Communication Interoperability Protocol).

В работе [6] рассмотрены варианты реализации технологии «хэндовер» для АТ обслуживаемых в ССС MUOS. Указывается, что критериальным уровнем при котором начинает срабатывать схема «хэндовера» АТ является достижение значения ОСШ 1 дБ в текущем луче «КА – АТ», а при достижении 0,5 дБ абонент для данного луча считается «потерянным». При этом рабочим диапазоном ОСШ для линии связи «КА – АТ» считается диапазон 0,5-6,5 дБ. На рис. 8 представлена статистическая оценка интенсивности событий (штук в день), заключающихся в организации связи КА – АТ с определенным значением ОСШ в зоне приема мобильных АТ. Данный график демонстрирует, что большая часть АТ MUOS устанавливают соединения, находясь в зонах со слабым приемом.

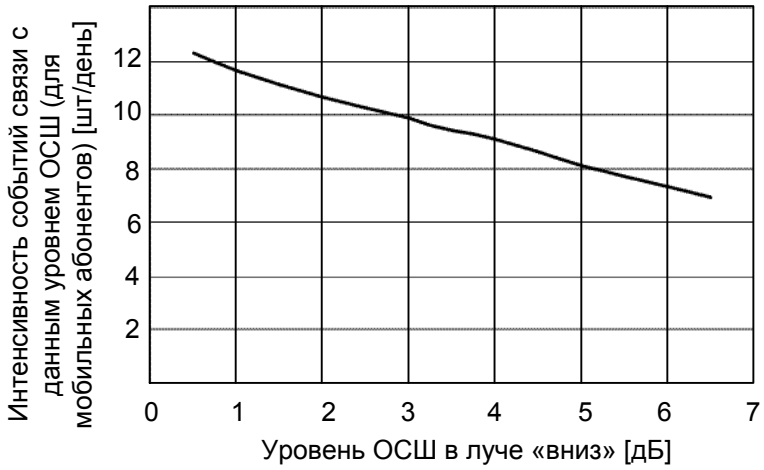

Рис. 8. Оценка интенсивности событий (шт. в день), заключающихся в установлении связи КА – АТ с определенным значением ОСШ в зоне приема мобильных АТ [6]

2.4. Особенности организации узкополосной связи комплектом «старого оборудования» КА MUOS

В «старом» оборудовании УВЧ диапазона используется процедура многостанционного доступа АТ с предоставлением каналов по требованию по технологии DAMA (Demand Assigned Multiple Access). При этом, для «обратной совместимости» с системами военной спутниковой связи ОВЧ-УВЧ диапазона (FLTSATCOM, MILSTAR) разработано 4-е военных стандарта DAMA:

- MIL-STD-188-181 для режима одностанционного доступа в каналы связи шириной 5 и 25 кГц. Этот стандарт имеет две модификации: MIL-STD-188-181A и MIL-STD-188-181B, последняя из которых позволяет увеличить пропускную способность почти в 3 раза;
- MIL-STD-188-182 для многостанционного доступа в каналы шириной 5 кГц в режиме DAMA, имеет модификацию MIL-STD-188-182A;
- MIL-STD-188-183 для многостанционного доступа в каналы шириной 25 кГц в режиме DAMA, имеет модификацию MIL-STD-188-183A;
- MIL-STD-188-185 для системы управления спутниковой системой связи ОВЧ-УВЧ диапазона, функционирующей в режиме DAMA. Данный стандарт является основой функционирования интегрированной системой управления объединенной спутниковой системы связи ОВЧ-УВЧ диапазона JMINI (Joint MilSatCom Network Integrated).

Из вышеуказанных стандартов в «старом» оборудовании УВЧ диапазона КА MUOS применяются стандарты MIL-STD-188-182 и MIL-STD-188-183.

Протокол DAMA реализует вариант предоставления по требованию разделяемого по времени и частоте радиоресурса КА, обеспечивая для АТ множественный доступ с частотным разделением (МДЧР) ко всем частотным каналам КА, при том, что в каждом отдельном частотном канале дополнительно реализуется множественный доступ с временным разделением (МДВР) к отдельным тайм-слотам. Такой способ множественного доступа обозначатся MF-TDMA (Multi-Frequency Time-Division Multiple Access).

Автоматическую реализацию технологии DAMA обеспечивает аппаратура TACS (Terminal Access Control System), включающая контроллер многостанционного доступа (МД), контроллер управления АТ, дуплексный приемопередатчик и оконечные устройства (вокодер, телетайп и аппаратуру передачи данных). Контроллер МД осуществляет прием и идентификацию заявок на передачу сообщений, оценивает ресурс КА, предоставляет каналы по заявкам за время от 2 с до 1 мин. В управляющем сообщении указываются номер частотного канала, номер и длительность временного интервала в цикле МДВР, скорость сверточного кодирования (1/2, 2/3, 3/4, или 4/5) и групповая скорость передачи данных. Контроллер управления АТ обеспечивает буферизацию данных пользователей, исполнение команд контроллера МД, сверточное кодирование/декодирование и перемежение/деперемежение информации, а также поддержание цикловой и кадровой синхронизации в режиме МДВР. Оконечные АТ могут работать со скоростями 0,075-16 кбит/с, при этом передатчик выдает на

КА групповой сигнал QPSK с битовой скоростью 9,6; 16; 19,2 или 32 кбит/с. Некоторые старые АТ помимо QPSK могут использовать и сигналы BPSK.

Дополнительные сведения о порядке функционирования технологии DAMA в соответствии со стандартами MIL-STD-188-181C/182B/183B/185A в узкополосных ССС изложены в работах [28, 29].

Комплект «старого» оборудования КА MUOS включает 39-канальный ретранслятор с переносом спектра. Каналы связи имеют ширину полосы 25 кГц (18 каналов) и 5 кГц (21 канал).

Максимальная пропускная способность «старого» оборудования всей системы MUOS составляет 1,02 Мбит/с, что соответствует 424 одновременным соединениям со скоростью 2,4 кбит/с. В целом, при равномерной загрузке всех 4-х КА системы MUOS максимальная пропускная способность «старого» оборудования одного КА составит около 254 кбит/с (106 одновременных соединений со скоростью 2,4 кбит/с).

Способы коммутации каналов «старого» оборудования через ШС, а также возможности использования узкополосных линий связи для передачи современного IP трафика с учетом требований по качеству обслуживания рассмотрены в работе [9].

2.5. Особенности организации связи в фидерных линиях КА MUOS

Применение 16-лучевой антенны и комплекта «нового» оборудования обеспечивает прием и передачу одним КА 64 WCDMA-каналов (16 лучей по 4 WCDMA-канала), из которых по 32 канала транслируется в фидерную линию Ка диапазона на две ШС в зоне обслуживания КА. В обратном направлении от каждой ШС передается по 32 WCDMA-канала на каждый из 2-х КА в зоне радиовидимости ШС [1, 8].

При перекоммутировании абонентских WCDMA-каналов в фидерную линию к передаваемым данным применяется турбо-кодирование со скоростью 0,711, а также преобразование Адамара, что позволяет сформировать итоговый 8PSK сигнал со скоростью модуляции 384 мегасимволов в секунду. Преобразование Адамара снижает требуемую скорость передачи данных, позволяя в выделенном диапазоне фидерной линии передать все 32 WCDMA-канала. В наземном оборудовании ШС выполняется обратное преобразование Адамара и восстанавливаются данные абонентских каналов [8].

Частотный план КА MUOS для фидерных линий связи в Ка диапазоне соответствует 30-31 ГГц – для линии «вверх» и 20,2-21,2 ГГц – для линии «вниз». В фидерной линии «вниз» передаются несколько групп каналов [8, 15]:

- в диапазоне частот 20,2-20,25 ГГц (при использовании круговой поляризации левого вращения) – канал передачи телеметрии для управления КА;
- в диапазоне частот 20,2-20,7 ГГц (при использовании круговой поляризации правого вращения) – группа из 11 каналов с общей скоростью 819 Мбит/с (тип сигнала – 8PSK; помехоустойчивое кодирование – турбо код со скоростью 0,711; преобразование Адамара);

- в диапазоне частот 20,7-21,2 ГГц (при использовании круговой поляризации левого вращения) – группа из 10 каналов и один канал геоданных с общей скоростью 819 Мбит/с (тип сигнала – 8PSK; помехоустойчивое кодирование – турбо код со скоростью 0,711; преобразование Адамара);
- в диапазоне частот 20,7-21,2 ГГц (при использовании круговой поляризации правого вращения) – группа из 11 каналов с общей скоростью 819 Мбит/с (тип сигнала – 8PSK; помехоустойчивое кодирование – турбокод со скоростью 0,711; преобразование Адамара).

Схема, поясняющая использование частот в фидерной линии, представлена на рис. 9 по данным из работы [8].

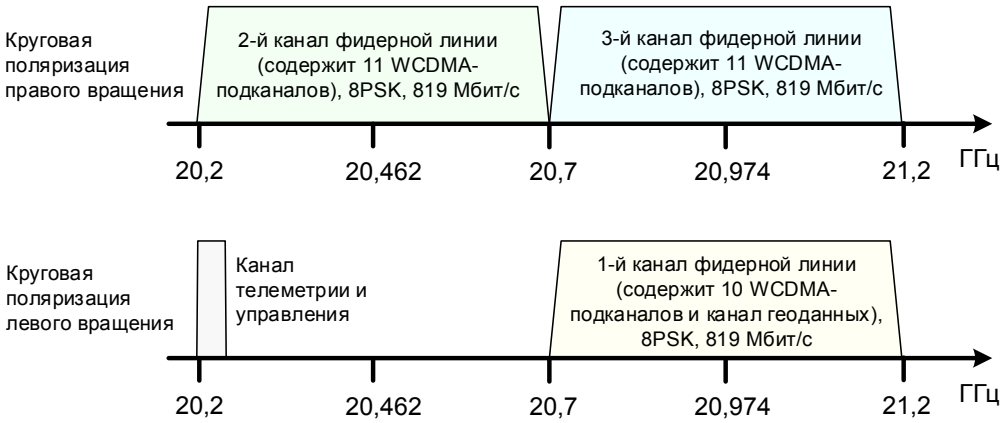

Рис. 9. Использование частот в фидерной линии [8]

Опыт использования турбокодов в системах ШПС-связи показывает, что эти коды уязвимы к возникновению низкочастотного корреляционного остаточного фазового шума в демодуляторе. Для снижения этого шума используется поддержание максимально возможной скорости передачи в фидерной линии, а также чередование блоков турбо-кода. При чередовании, 1024 символа турбокода чередуются по 16 блокам (рис. 10) [8].

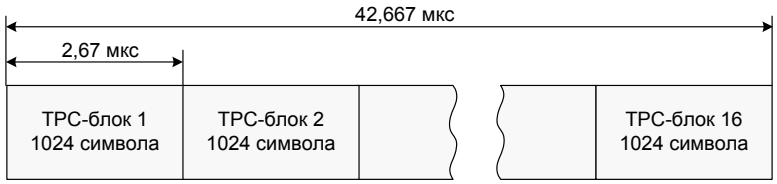

Рис. 10. Схема блоков турбокода с чередованием символов во фрейме [8]

Тракт бортового оборудования КА обеспечивающего трансляцию абонентских линий в фидерную линию представлен на рис. 11 по данным из работы [5].

Подробное описание формирования сигналов фидерной линии КА MUOS представлено в работах [5, 8].

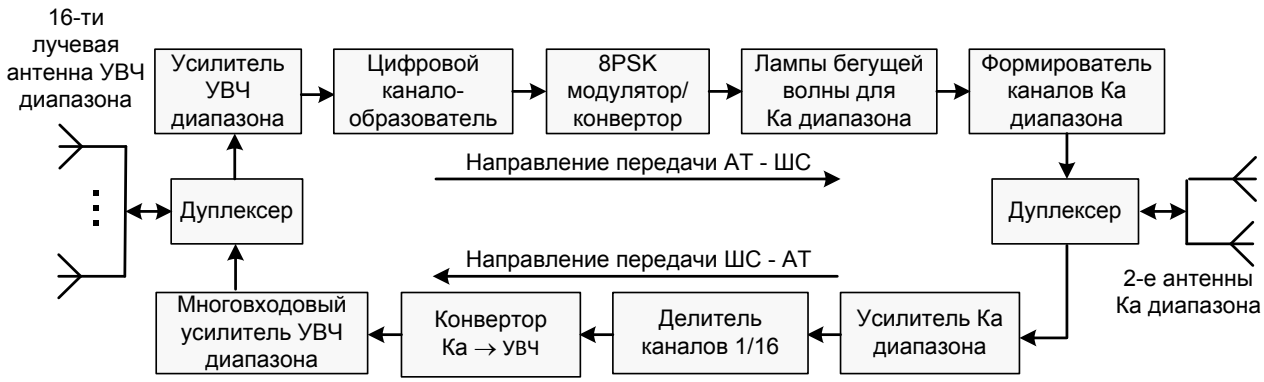

Рис. 11. Тракт бортового оборудования КА MUOS обеспечивающий трансляцию 64 абонентских WCDMA-каналов из УВЧ диапазона в фидерную линию Ка диапазона [5]

3. Наземные средства спутниковой связи ССС MUOS

3.1. Абонентские терминалы

В сухопутных войсках в качестве основного средства спутниковой связи системы MUOS в УВЧ диапазоне предполагается использовать унифицированные многофункциональные программируемые АТ системы JTRS такие как AN/PRC-117G, AN/PRC-155, AN/PRC-158, AN/PRC-162(V)1, AN/ARC-210 и др., способные работать с WCDMA-каналами «нового» оборудования ССС MUOS [12]. Типовая мощность данных радиостанций – порядка 20 Вт. Данные о других технических характеристиках конкретных радиостанций представлены в материалах [30-33]. Данные о бюджете линии связи «АТ – КА» в ССС MUOS представлены в работе [2]. Особенности интеграции ССС MUOS в систему JTRS изложены в работе [13].

В таблице 3 представлены статистические данные по временным и скоростным параметрам работы АТ в ССС MUOS [6, 12].

3.2. Средства связи шлюзовых станций

Средства связи ШС, размещенных на Вахиаве (Гавайские острова, США), в Норсвест (шт. Вирджиния, США), Коджерне (западная Австралия) и Нисцеми (о. Сицилия, Италия) являются типовыми [1]. О параметрах оборудования ШС MUOS можно судить по данным, представленным в работах [34, 35], посвященных электромагнитной безопасности жителей г. Нисцеми (о. Сицилия, Италия). ШС оборудована 3-мя параболическими антеннами диаметром 18,4 м, каждая из которых обеспечивает поддержание фидерной линии на отдельный КА MUOS. Частоты фидерной линии («вверх» / «вниз») – 30-31 / 20,2-21,2 ГГц. Мощность передатчика – 1,6 кВт. Коэффициент усиления антенны составляет 41,4 дБ, а ЭИИМ – 91,4 дБВт.

Таблица 3 – Статистические данные по временным параметрам функционирования АТ в ССС MUOS [6, 12]

Тип АТ	Тип сети	Ср. время длительности соединения, с	Ср. время между соединениями, с	Кол-во устанавливаемых соединений в год, шт.	Max время длительности соединения, с	Ср. время в течении которого уровень сигнала падал ниже 1 дБ, мин	Вероятность снижения ОСШ ниже уровня в 1 дБ за длительность соединения	Скорость передачи данных от КА к АТ: min/оптимум/max, кбит/с
Самолет истребитель	Сеть	114,7	279	113150	1546,4	4,75	0,0835	16/16/900+
	Точка-точка	0,3	2,7	11598605	4,6	4,75	0	16/16/900+
Самолет	Сеть	118,6	367,4	86140	1890,1	4,75	0,0905	32/64/900+
	Точка-точка	3,1	9	3504000	42,7	4,75	$3{,}8\cdot10^{-40}$	32/64/900+
Вертолет	Сеть	111,5	237,4	132860	1474,2	18	$6{,}2\cdot10^{-5}$	16/16/220
Отдельный солдат	Точка-точка	120	1550,1	20440	1784,6	275	$1{,}3\cdot10^{-65}$	9,6/32/32
Солдат с ранцевой радиостанцией - точкой доступа	Сеть	117,3	254,1	124465	1806,9	250	$2{,}9\cdot10^{-56}$	9,6/32/32
Боевая машина с радиостанцией - точкой доступа в движении	Сеть	107,8	234,1	135050	1514,3	45	$1{,}3\cdot10^{-11}$	32/64/64
	Точка-точка	118,2	2346,6	13505	1559,9	45	$1{,}2\cdot10^{-10}$	32/64/64
Самолет – ракета	Точка-точка	4,1	32,9	958490	63,6	6	$1{,}4\cdot10^{-39}$	32/32/667
Удаленные устройства наблюдения	Сеть	3,9	19,8	1539940	55,3	250	0	2,4/2,4/2,4
Корабль	Сеть	118,7	314,1	100740	1765,5	120	$4{,}7\cdot10^{-27}$	64/64/64
	Точка-точка	4,1	32,9	958490	51,9	120	0	64/64/64
Подводная лодка	Сеть	118,6	367,4	86140	1657,9	365	$6{,}6\cdot10^{-81}$	32/64/64
	Точка-точка	3,2	21,1	1495405	53,6	365	0	32/64/64
Самолет – БПЛА	Точка-точка	3,1	9	3504000	42,2	9	$2\cdot10^{-75}$	64/64/460

4. Сведения о полярном дополнении ССС MUOS на основе экспериментального КА TacSat-4

В сентябре 2011 г. с целью экспериментальной проверки возможностей организации связи в районах Арктики с использованием протоколов связи ССС MUOS был запущен КА TacSat-4. Орбита космического аппарата – эллиптическая с перигеем 674,7 км, апогеем 12074,8 км в районе северного полюса Земли и наклоном плоскости орбиты в 63,4°. Период обращения КА ≈4 ч. TacSat-4 – экспериментальный КА разведки и связи, спроектированный научно-

исследовательской лабораторией ВМС США при участии компаний Boeing, General Dynamics и Raytheon. Масса – 460 кг, диаметр антенны – 3,8 м. Внешний вид КА представлен на рис. 12 [14, 20].

Рис. 12. Внешний вид КА TacSat-4 [14]

Назначение КА TacSat-4 [14, 20]:

- обеспечение подразделений ВМС США в Арктическом регионе связью с использованием стандартов связи «старого» и «нового» оборудования ССС MUOS;
- ведение радиоразведки в Арктическом регионе;
- сбор данных с буев обнаружения подводных лодок, размещенных в Арктическом регионе.

КА TacSat-4 обеспечивает до 10 каналов узкополосной связи «старого» оборудования с шириной полос 5 и 25 кГц (от 2,4 до 16 кбит/с) в УВЧ диапазоне 292-318 / 244-270 МГц. Также на КА TacSat-4 установлено «новое» оборудование ССС MUOS формирующее WCDMA-каналы 5 МГц для информационного сопряжения АТ Арктического региона через данный КА [14, 20].

Испытания и эксплуатация КА TacSat-4 позволяют ВМС США определить будущую потребность в КА связи на высокоэллиптической орбите, действующих совместно с КА MUOS на ГСО [14, 20].

Заключение

В статье представлена описательная модель геостационарной ССС MUOS. Данная модель может использоваться для формирования исходных данных при формализации связных процессов, по аналогии с некоторыми отечественными геостационарными ССС специального назначения. Кроме того, данная модель может быть использована при проектировании АТ, функционирующих совместно с ССС MUOS, в перспективных международных проектах обеспечения услугами связи воинских подразделений ООН и при проведении совместных учений в рамках партнерства «Россия – НАТО».

Литература

1. Oetting J. D., Jen T. The Mobile User Objective System // Johns Hopkins APL Technical Digest. 2011. Vol. 30. № 2. P. 103-112.

2. MacMullan S. J., Karpinsky Ch. J., Eaves R. E., Dion A. R. Geosynchronous Satellites for MUOS // MILCOM 1999. IEEE Military Communications. Conference Proceedings. Vol. 2. – IEEE, 1999. – P. 1119-1124.

3. Dankberg M. D., Miller M. J., Sullivan W. F., Taylor L. E. A Robust Satellite System Architecture for the Mobile User Objective System // MILCOM 1999. IEEE Military Communications. Conference Proceedings. Vol. 2. – IEEE, 1999. – P. 1131-1135.

4. Gündüzhan E., Brown K. D. Narrowband Satellite Communications: Challenges and Emerging Solutions // Johns Hopkins APL Technical Digest. 2015. Vol. 33. № 1. P. 52-56.

5. Marshall J., Hazelton L., Pal P., Kullstam P., Grigals A. Algorithms for MUOS capacity analysis // MILCOM 2007. IEEE Military Communications Conference. – IEEE, 2007. – P. 1-6.

6. Haylock F., Butts N. Analyzing the effects of mobility events on MUOS terminals // MILCOM 2008. 2008 IEEE Military Communications Conference. – IEEE, 2008. – P. 1-7.

7. Okrah P., Bahr R. K. Channel and interference mitigation in the MUOS base-to-user link // MILCOM-2008. 2008 IEEE Military Communications Conference. – IEEE, 2008. – P. 1-5.

8. Helwig A. P., Hu B. High rate Ka-band downlink digital receiver for MUOS // MILCOM 2007. IEEE Military Communications Conference. – IEEE, 2007. – P. 1-7.

9. Medina O., Cross M., Bryant J., Simpkins B., Criddle J., Pitts C., Hryckiewicz S. Mobile User Objective System (MUOS) to Legacy UHF Gateway Component (MLGC) // MILCOM-2010. 2010 Military communications conference. – IEEE, 2010. – P. 697-701.

10. Sadowsky J. S. The MUOS base station RAKE receiver // MILCOM 2008. 2008 IEEE Military Communications Conference. – IEEE, 2008. – P. 1-7.

11. Chu L. C., Tu A. Support MUOS all IP services with the FEC enhancement // MILCOM 2006. 2006 IEEE Military Communications conference. – IEEE, 2006. – P. 1-7.

12. Seggerty R. L. MUOS: Application in naval helicopter operations. Master's Thesis. – Monterey: Naval Postgraduate School, 2015. – 89 p.

13. Stephens D. R., Magsombol C., Browne N. Network programming of joint tactical radio system radios // MILCOM 2008. 2008 IEEE Military Communications Conference. – IEEE, 2008. – P. 1-6.

14. TacSat-4 (Tactical Satellite-4) // eoPortal Directory [Электронный ресурс]. 2019. – URL: https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/tacsat-4 (дата доступа 03.03.2019).

15. Михайлов Р. Л. Описательные модели систем спутниковой связи как космического эшелона телекоммуникационных систем специального назначения. Монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2019. – 148 с.

16. Храмов В. Ю., Чепурнов П. А. Состояние и перспективы развития систем спутниковой связи тактического звена управления США и стран НАТО // Информация и космос. 2016. № 2. С. 23-26.

17. Макаренко С. И. Использование космического пространства в военных целях: современное состояние и перспективы развития систем информационно-космического обеспечения и средств вооружения // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 4. С. 161-213. – URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2016-04/09-Makarenko.pdf (дата доступа 03.03.2019).

18. Московитов Н., Рыбаков Г. Перспективы создания глобальной информационной сети МО США // Зарубежное военное обозрение. 2013. № 7. С. 8-19.

19. Свитов Р. Состояние и перспективы развития американских военных систем спутниковой связи // Зарубежное военное обозрение. 2013. № 12. С. 63-68.

20. Крылов А. Космические системы военной связи США: анализ состояния и развития // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 24.10.2013. – URL: http://topwar.ru/34992-kosmicheskie-sistemy-voennoy-svyazi-ssha-analiz-sostoyaniya-i-razvitiya.html (дата доступа 03.03.2019).

21. Строгов С. Перспективные системы спутниковой связи военного назначения ведущих зарубежных стран // Зарубежное военное обозрение. 2009. № 5. С. 50-58. – URL: http://pentagonus.ru/publ/18-1-0-1161 (дата доступа 03.03.2019).

22. Макаренко С. И. Описательная модель сети связи специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 113-164. – URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/05-Makarenko.pdf (дата обращения 03.03.2019).

23. Макаренко С. И. Перспективы и проблемные вопросы развития сетей связи специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 18-68. – URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/02-Makarenko.pdf (дата обращения 03.03.2019).

24. Макаренко С. И. Описательная модель системы спутниковой связи Iridium // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 1-34. URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/01-Makarenko.pdf (дата обращения 03.03.2019).

25. Макаренко С. И. Описательная модель системы спутниковой связи Inmarsat // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 64-91. URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/04-Makarenko.pdf (дата обращения 03.03.2019).

26. Макаренко С. И., Михайлов Р. Л., Новиков Е. А. Исследование канальных и сетевых параметров канала связи в условиях динамически изменяющейся сигнально–помеховой обстановки // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 10. С. 2. – URL: http://jre.cplire.ru/jre/oct14/3/text.pdf (дата обращения 05.03.2019).

27. ETSI TS 125 211 v. 7.2.0 (2007-05). Universal Mobile Telecommunications System (UMTS). Physical channels and mapping of transport channels onto physical channels (FDD). 3GPP TS 25.211 version 7.2.0 Release 7. – Route des Lucioles, European Telecommunications Standards Institute, 2007. – 55 p. – URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/125200_125299/125211/07.02.00_60/ts_125211v070200p.pdf (дата обращения 05.03.2019).

28. Booton R. Reducing terminal slot contention by applying set theory to the integrated waveform (DAMA UHF SatCom) // MILCOM 2009-2009 IEEE Military Communications Conference. – IEEE, 2009. – P. 1-7.

29. Wadsworth D. v. Z. Military Communications Satellite System Multiplies UHF Channel Capacity for Mobile Users // MILCOM 1999. IEEE Military Communications. Conference Proceedings. – IEEE, 1999. – T. 2. – P. 1145-1152.

30. Harris Falcon III AN/PRC-158 Multi-Channel Manpack (MCMP) // Harris Corporation [Электронный ресурс]. 2018. – URL: http://harris.com (дата обращения 05.07.2019).

31. Радиостанция AN/PRC-155 // Военная связь [Электронный ресурс]. 2019. – URL: https://military.trcvr.ru/2015/09/05/%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D1%86%D0%B8%D1%8F-anprc-155/ (дата обращения 05.03.2019).

32. Trunet AN/PRC-162(V)1 Two-Channel Networking Ground Radio // Collins Aerospace [Электронный ресурс]. 2019. – URL: https://www.rockwellcollins.com/-/media/files/unsecure/products/product-brochures/communcation-and-networks/communication-radios/trunet-prc-162-gr-2500.pdf?lastupdate=20190701180641 (дата обращения 05.03.2019).

33. Александров С., Туров Д. Перспективные системы и средства радиосвязи тактического звена управления ВС США // Зарубежное военное обозрение. 2018. № 11. С. 42-48. – URL: http://pentagonus.ru/publ/perspektivnye_sistemy_i_sredstva_radiosvjazi_takticheskogo_zvena_upravlenija_vs_ssha_2018/11-1-0-2868 (дата доступа 03.07.2019).

34. Zucchetti M., Coraddu D. M. Mobile User Objective System (MUOS) presso il Naval Radio Transmitter Facility (NRTF) di Niscemi: Analisi dei rischi. – Facoltà di Ingegneria: Università degli studi di Palermo, 2011. – 14 p. – URL: https://www.researchgate.net/profile/Massimo_Zucchetti2/publication/310074876_Mobile_User_Objective_System_MUOS_presso_il_Naval_Radio_Transmitter_Facility_NRTF_di_Niscemi_Analisi_dei_rischi/links/5828a75308ae950ace6fed3a/Mobile-User-Objective-System-MUOS-presso-il-Naval-Radio-Transmitter-Facility-NRTF-di-Niscemi-Analisi-dei-rischi.pdf (дата доступа 03.07.2019).

35. Zanforlin L., Levrieri P. MUOS – Trasmissione parere sul rischio per la popolazione di Niscemi. Ufficio Presidenza Regione Sicilia. Protocollo no. 5515, 25.05.2011.

36. ATP 6-02.54. Techniques for satellite communications. – Washington, DC: Headquarters Department of the Army, 2017. – 105 p.

37. Спутниковые системы связи и вещания. 2019. № 1. – URL: http://www.radiotec.ru/media/journal/%D0%94%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D0

%BB%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5-CCCB-2019-1.pdf (дата доступа 03.07.2019).

38. Спутниковые системы связи и вещания. 2019. № 2. – URL: http://www.radiotec.ru/media/journal/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BB%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_2019_2.pdf (дата доступа 03.07.2019).

References

1. Oetting J. D., Jen T. The Mobile User Objective System. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 2011, vol. 30, no. 2, pp. 103-112.

2. MacMullan S. J., Karpinsky Ch. J., Eaves R. E., Dion A. R. Geosynchronous Satellites for MUOS. *MILCOM 1999. IEEE Military Communications. Conference Proceedings*, 1999, vol. 2, pp. 1119-1124.

3. Dankberg M. D., Miller M. J., Sullivan W. F., Taylor L. E. A Robust Satellite System Architecture for the Mobile User Objective System. *MILCOM 1999. IEEE Military Communications. Conference Proceedings*, 1999, vol. 2, pp. 1131-1135.

4. Gündüzhan E., Brown K. D. Narrowband Satellite Communications: Challenges and Emerging Solutions. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 2015, vol. 33, no. 1, pp. 52-56.

5. Marshall J., Hazelton L., Pal P., Kullstam P., Grigals A. Algorithms for MUOS capacity analysis. *MILCOM 2007. IEEE Military Communications Conference*, 2007, pp. 1-6.

6. Haylock F., Butts N. Analyzing the effects of mobility events on MUOS terminals. *MILCOM 2008. 2008 IEEE Military Communications Conference*, 2008, pp. 1-7.

7. Okrah P., Bahr R. K. Channel and interference mitigation in the MUOS base-to-user link. *MILCOM-2008. 2008 IEEE Military Communications Conference*, 2008, pp. 1-5.

8. Helwig A. P., Hu B. High rate Ka-band downlink digital receiver for MUOS. *MILCOM 2007. IEEE Military Communications Conference*, 2007, pp. 1-7.

9. Medina O., Cross M., Bryant J., Simpkins B., Criddle J., Pitts C., Hryckiewicz S. Mobile User Objective System (MUOS) to Legacy UHF Gateway Component (MLGC). *MILCOM-2010. 2010 Military communications conference*, 2010, pp. 697-701.

10. Sadowsky J. S. The MUOS base station RAKE receiver. *MILCOM 2008. 2008 IEEE Military Communications Conference*, 2008, pp. 1-7.

11. Chu L. C., Tu A. Support MUOS all IP services with the FEC enhancement. *MILCOM 2006. 2006 IEEE Military Communications Conference*, 2006, pp. 1-7.

12. Seggerty R. L. *MUOS: Application in naval helicopter operations. Master's Thesis*. Monterey, Naval Postgraduate School, 2015. 89 p.

13. Stephens D. R., Magsombol C., Browne N. Network programming of joint tactical radio system radios. *MILCOM 2008. 2008 IEEE Military Communications Conference*, 2008, pp. 1-6.

14. TacSat-4 (Tactical Satellite-4). *eoPortal Directory*, 2019. Available at: https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/tacsat-4 (accessed 03 Mach 2019).

15. Mikhailov R. L. *Opisatelnye modeli sistem sputnikovoj svyazi kak kosmicheskogo eshelona telekommunikacionnyh sistem specialnogo naznacheniya. Monografiya* [*Descriptive models of satellite communication systems as a space echelon of special purpose telecommunication systems. Monograph*]. Saint Petersburg, Naukoemkie Tekhnologii Publ., 2019. 148 p. (in Russian).

16. Khramov V. Ju., Chepurnov P. A. US and NATO Satellite Communication System Tactical Wing Management: Current State and Development Prospects. *Informatsiia i kosmos*, 2016, no. 2, pp. 23-26 (in Russian).

17. Makarenko S. I. Information-Space Systems and Space Weapons – Current State and Prospects of Improvement. *Systems of Control, Communication and Security*, 2016, no. 4, pp. 161-213. Available at: http://sccs.intelgr.com/archive/2016-04/09-Makarenko.pdf (accessed 03 Mach 2019) (in Russian).

18. Moskovitov N., Rybakov G. Perspektivy sozdaniya global'noj informacionnoj seti MO SSHA [Prospects for the creation of a global information network of the US DOD]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2013, no. 7, pp. 8-19 (in Russian).

19. Svitov R. Sostoyanie i perspektivy razvitiya amerikanskih voennyh sistem sputnikovoj svyazi [State and prospects of development of American military satellite communication systems]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2013, no. 12, pp. 63-68 (in Russian).

20. Krylov A. Kosmicheskie sistemy voennoi sviazi SShA: analiz sostoianiia i razvitiia [Space systems military communications of the United States: analysis of the status and development]. *Voennoe obozrenie* [Military review], 24 October 2013. Available at: http://topwar.ru/34992-kosmicheskie-sistemy-voennoy-svyazi-ssha-analiz-sostoyaniya-i-razvitiya.html (accessed 03 Mach 2019) (in Russian).

21. Strogov S. Perspektivnye sistemy sputnikovoi sviazi voennogo naznacheniia vedushchikh zarubezhnykh stran [Prospective satellite communication system for military purposes leading countries]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2009, no. 5, pp. 50-58. Available at: http://pentagonus.ru/publ/18-1-0-1161 (accessed 03 Mach 2019) (in Russian).

22. Makarenko S. I. Descriptive Model of a Special Purpose Communication Network. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 2, pp. 113-164. Available at: http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/05-Makarenko.pdf (accessed 03 Mach 2019) (in Russian).

23. Makarenko S. I. Prospects and Problems of Development of Communication Networks of Special Purpose. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 2, pp. 18-68. Available at: http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/02-Makarenko.pdf (accessed 03 Mach 2019) (in Russian).

24. Makarenko S. I. Descriptive Model of Iridium Satellite Communication System. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 4, pp. 1-34. Available at: http://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/01-Makarenko.pdf (accessed 03 Mach 2019) (in Russian).

25. Makarenko S. I. Descriptive Model of Inmarsat Satellite Communication System. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 4, pp. 64-91. Available at: http://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/04-Makarenko.pdf (accessed 03 Mach 2019) (in Russian).

26. Makarenko S. I., Mikhailov R. L., Novikov E. A. The research of data link layer and network layer parameters of communication channel in the conditions of dynamic vary of the signal and noise situation. *Journal of Radio Electronics*, 2014, no. 10, pp. 2. Available at: http://jre.cplire.ru/jre/oct14/3/text.pdf (accessed 05 Mach 2019) (in Russian).

27. *ETSI TS 125 211 v. 7.2.0 (2007-05). Universal Mobile Telecommunications System (UMTS). Physical channels and mapping of transport channels onto physical channels (FDD)*. 3GPP TS 25.211 version 7.2.0 Release 7. Route des Lucioles, European Telecommunications Standards Institute, 2007. 55 p. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/125200_125299/125211/07.02.00_60/ts_125211v070200p.pdf (accessed 05 Mach 2019).

28. Booton R. Reducing terminal slot contention by applying set theory to the integrated waveform (DAMA UHF SatCom). *MILCOM 2009-2009 IEEE Military Communications Conference*, 2009, pp. 1-7.

29. Wadsworth D. v. Z. Military Communications Satellite System Multiplies UHF Channel Capacity for Mobile Users. *MILCOM 1999. IEEE Military Communications. Conference Proceedings*, 1999, vol. 2, pp. 1145-1152.

30. Harris Falcon III AN/PRC-158 Multi-Channel Manpack (MCMP). Harris Corporation, 2018. Available at: http://harris.com (accessed 05 Mach 2019).

31. Radio station AN/PRC-155. *Military communication*, 2019. Available at: https://military.trcvr.ru/2015/09/05/%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D1%86%D0%B8%D1%8F-anprc-155/ (accessed 05 Mach 2019).

32. Trunet AN/PRC-162(V)1 Two-Channel Networking Ground Radio. *Collins Aerospace*, 2019. Available at: https://www.rockwellcollins.com/-/media/files/unsecure/products/product-brochures/communcation-and-networks/communication-radios/trunet-prc-162-gr-2500.pdf?lastupdate=20190701180641 (accessed 05 Mach 2019).

33. Aleksandrov S., Turov D. Perspektivnye sistemy i sredstva radiosvyazi takticheskogo zvena upravleniya VS SSHA [Advanced systems and means of radio communication tactical management of the US armed forces]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie* [Foreign military review], 2018, no. 11, pp. 42-48. Available at: http://pentagonus.ru/publ/perspektivnye_sistemy_i_sredstva_radiosvjazi_takticheskogo_zvena_upravlenija_vs_ssha_2018/11-1-0-2868 (accessed 03 June 2019) (in Russian).

34. Zucchetti M., Coraddu D. M. *Mobile User Objective System (MUOS) presso il Naval Radio Transmitter Facility (NRTF) di Niscemi: Analisi dei rischi.* Facoltà di Ingegneria: Università degli studi di Palermo, 2011. 14 p. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Massimo_Zucchetti2/publication/310074876_Mobile_User_Objective_System_MUOS_presso_il_Naval_Radio_Transmitter_Facility_NRTF_di_Niscemi_Analisi_dei_rischi/links/5828a75308ae950ace6fed3a/Mobile-

User-Objective-System-MUOS-presso-il-Naval-Radio-Transmitter-Facility-NRTF-di-Niscemi-Analisi-dei-rischi.pdf (accessed 03 June 2019) (in Italian).

35. Zanforlin L., Levrieri P. *MUOS – Trasmissione parere sul rischio per la popolazione di Niscemi*. Ufficio Presidenza Regione Sicilia. Protocollo no. 5515, 25 Mach 2011. (in Italian).

36. *ATP 6-02.54. Techniques for satellite communications*. Washington, DC, Headquarters Department of the Army, 2017. 105 p.

37. *Sputnikovye sistemy svyazi i veshchaniya* [*Satellite communication and broadcasting systems*]. 2019, no. 1. Available at: http://www.radiotec.ru/media/journal/%D0%94%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5-CCCB-2019-1.pdf (accessed 03 June 2019).

38. *Sputnikovye sistemy svyazi i veshchaniya* [*Satellite communication and broadcasting systems*]. 2019, no. 2. Available at: http://www.radiotec.ru/media/journal/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BB%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_2019_2.pdf (accessed 03 June 2019).

Статья поступила 20 сентября 2019 г.

Информация об авторе

Макаренко Сергей Иванович – доктор технических наук, доцент. Профессор кафедры информационной безопасности. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина). Заместитель генерального директора по научной работе – главный конструктор. ООО «Корпорация «Интел Групп». Область научных интересов: сети и системы связи; радиоэлектронная борьба; информационное противоборство. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Адрес: Россия, 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.

Descriptive Model of MUOS satellite communication system

S. I. Makarenko

Relevance. *Providing communicational services for the military units, which protect Russian interests outside the country's border, needs the development of a military satellite communication systems (MILSATCOMM), which possesses a global cover zone of the Earth. Nowadays, in Russia several of such projects are being developed. At the same time, justification of technical solutions for these MILSATCOMM demands basic data formation for various options of the organization of communication modeling. To provide such basic data formation, another technologically developed MILSATCOMM can be used. This MILSATCOMM is the Mobile User Object System (MUOS). MUOS provides global communication services for mobile divisions of the US Armed Forces and can be considered as a Russian MILSATCOMM prototype.* ***The purpose of work*** *is the descriptive MUOS MILSATCOMM model formation. Such descriptive model can be used for the basic data formation development, when coherent processes are being modeling in Russian MILSATCOMM, to make the scientifically based choice of the communicational organization principles, which are used in MILSATCOMM. For descriptive MUOS MILSATCOMM model development, only open sources are used.* ***Results and their novelty.*** *The elements of practical novelty of work are the revealed gen-*

eral technological features of MILSATCOMM construction and the used MILSATCOMM technology solutions. MUOS is used as the example. In particular, the general formation regularities of orbital satellite group, the principles of channel forming in «up» and «down» lines, the joint use options of a new and «inherited» channel-forming equipment, and also, the use of various technology solutions for increasing an anti-reconnaissance protection and an anti-jam robustness are described. ***Practical significance:*** *The descriptive model presented in this work can help technical specialists to substantiate new technology solutions for domestic MILSATCOMM. Also, this model can help scientists and candidates conducting scientific research in the field of satellite communication.*

Keywords*: model, descriptive model, satellite communication system, mobile satellite communication system, SATCOMM, MILSATCOMM, MUOS.*

Information about Author

Sergey Ivanovich Makarenko – Dr. habil. of Engineering Sciences, Docent. Professor of Information Security Department. Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI'. Field of research: stability of network against the purposeful destabilizing factors; electronic warfare; information struggle. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Address: Russia, 197376, Saint Petersburg, Professor Popov Street, 5.