

УДК 629.78

Описательная модель системы спутниковой связи Iridium

Макаренко С. И.

Актуальность. Обеспечение услугами связи таких перспективных проектов как освоение Северного морского пути, разработка полезных ископаемых Арктики и создание информационно-телеметрических систем мониторинга воздушного и наземного транспорта в высоких широтах требуют создания негеостационарных спутниковых систем связи (ССС). Данные СССР должны обеспечивать непрерывную и устойчивую связь для всех абонентов, находящихся в высоких широтах. В настоящее время в России разрабатывается проект негеостационарной СССР «Эфир» («Сфера»). При этом, обоснование технических решений данной СССР требует формирования исходных данных для моделирования различных вариантов организации связи. Для формирования таких исходных данных может быть использована другая негеостационарная СССР – Иридиум, которая может рассматриваться как прототип СССР «Эфир» («Сфера»). **Целью работы** является формирование описательной модели СССР «Иридиум». Данная описательная модель может использоваться для разработки исходных данных при моделировании связных процессов в отечественной негеостационарной СССР «Эфир» («Сфера») в интересах научно-обоснованного выбора принципов организации связи в ней. Для разработки описательной модели СССР Иридиум были использованы только открытые источники. **Результаты и их новизна.** Элементом практической новизны работы являются выявленные общие технологические особенности построения негеостационарных СССР на примере СССР Иридиум. В частности, описаны общие принципы формирования орбитальной группировки, каналообразования в линиях «вверх» и «вниз», использования сигнально-кодовых конструкций, организации протоколов на физическом, канальном и сетевом уровнях модели OSI при обеспечении соединений «точка-точка». Кроме того, в статье представлены статистические данные по качеству обслуживания абонентов в СССР Иридиум. **Практическая значимость.** Представленная в работе описательная модель будет полезна техническим специалистам для обоснования новых технологических решений для отечественной СССР «Эфир» («Сфера»). 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, Иридиум, Iridium.

Введение

В настоящее время в различных областях экономики важным является использование систем спутниковой связи (ССС), имеющих глобальные зоны покрытия Земли. Высокая экономическая значимость данных СССР подтверждается работами [1-3]. При этом, особое значение приобретают негеостационарные СССР, способные обеспечить связью абонентов в приполярных районах Земли. Наиболее технологически развитой такой СССР является система Iridium. Именно на основе негеостационарных СССР реализуются перспективные проекты обеспечения услугами связи: судов на Северном морском пути (работы

Библиографическая ссылка на статью:

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>

Reference for citation:

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> (in Russian).

[4, 5]), разработки месторождений и сил обеспечения безопасности в Арктике (работы [18, 19]) воздушных судов, коммерческой авиации (работа [6]) и даже информационно-телеметрических систем мониторинга ракетно-космической техники в полете (работа [7]). При этом, формирование этих связных услуг на этапе проектирования конкретных средств связи требует проведения предварительного моделирования и расчетов с целью формирования облика технических средств. Важность этого отмечается в работе [8], посвященной проектированию абонентского терминала (АТ) системы Iridium, а также в работе [9], посвященной разработке протокола маршрутизации для негеостационарной ССС. В интересах формирования исходных данных для подобного моделирования в статье предложена описательная модель ССС Iridium. Описательная модель сформирована на основе работ [10-12] и дополнена материалом работ [13-15, 17-19].

Назначение описательной модели – предоставление исходных данных для моделирования связных процессов в отечественной негеостационарной ССС «Эфир» («Сфера») [16] в интересах научно-обоснованного выбора принципов организации связи в данной ССС, прототипом которой может служить ССС Iridium.

Ввиду объемности, материал статьи был декомпозирован на ряд подразделов:

1. Общий обзор ССС Iridium.
2. Организации связи в ССС Iridium.
 - 2.1. Организация зон и лучей обслуживания каналообразующим оборудованием КА Iridium.
 - 2.2. Каналообразующее оборудование абонентских терминалов Iridium.
 - 2.3. Организация каналов связи.
 - 2.3.1. Служебные каналы.
 - 2.3.2. Абонентские каналы.
 - 2.3.2.1. Каналы передачи сообщений.
 - 2.3.2.2. Каналы передачи трафика;
 - 2.3.3. Уплотнение каналов.
 - 2.3.3.1. Временное уплотнение каналов.
 - 2.3.3.2. Частотное уплотнение каналов.
 - 2.3.3.2.1. Поддиапазон дуплексных несущих частот.
 - 2.3.3.2.2. Поддиапазон симплексных несущих частот.
 - 2.3.4. Сигнально-кодовые конструкции и способы регулирования мощности в каналах связи.
 - 2.3.4.1. Сигналы в каналах связи.
 - 2.3.4.2. Кодирование в каналах связи.
 - 2.3.4.3. Способы регулирования мощности в каналах связи.
 - 2.4. Протоколы организации связи.
 - 2.4.1. Протокол управления соединениями.
 - 2.4.2. Протокол управления мобильностью.
 - 2.4.3. Протокол канального уровня L-диапазона.
 - 2.4.4. Протокол канала ассоциированного управления L-диапазона.
 - 2.4.5. Протокол физического уровня L-диапазона.

- 2.5. Обработка вызовов в CCC Iridium.
 - 2.5.1. Обнаружение сигнала.
 - 2.5.2. Управление обнаружением сигнала и воспрещение доступа.
 - 2.5.3. Организация доступа.
 - 2.5.4. Регистрация в сети.
- 2.6. Процедура «хэндовера».
- 3. Качество обслуживания в CCC Iridium.
 - 3.1. Основные связные услуги передачи трафика.
 - 3.2. Время установления соединения.
 - 3.3. Своевременность передачи.
 - 3.4. Надежность связи.
 - 3.5. Качество обслуживания речевых вызовов.
 - 3.6. Оповещение о возможных перерывах в предоставлении услуг связи.
 - 3.7. Безопасность и защита.

1. Общий обзор CCC Iridium

В состав CCC Iridium входят орбитальная группировка (ОГ) КА, система управления и контроля, сегмент шлюзовых станции сопряжения, АТ и существующие системы проводной и беспроводной связи, сопрягаемые с CCC (рис. 1).

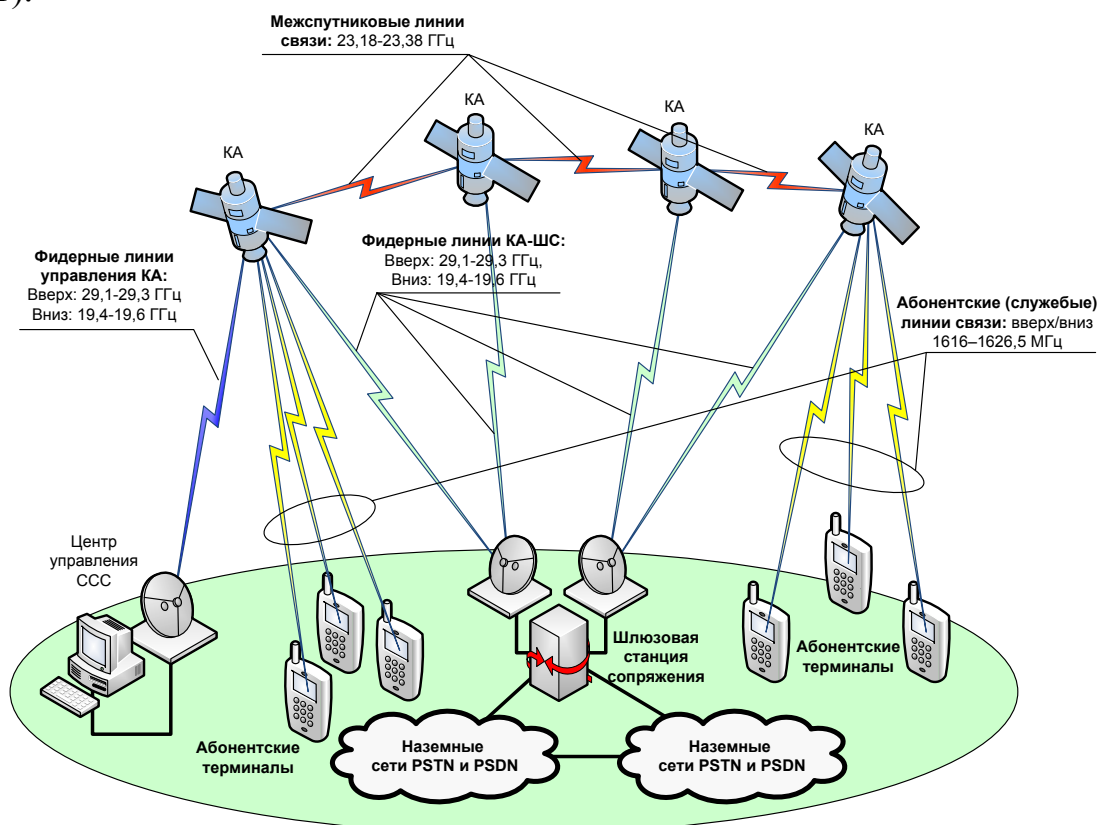


Рис. 1. Структура CCC Iridium

Штатная орбитальная группировка CCC Iridium включает в себя 66 основных космических аппаратов (КА), равномерно размещенных на приполяр-

ных орбитах с наклоном $86,4^\circ$ и высотой около 780 км. Дополнительно к этому имеются 6 резервных КА, расположенные на орбите высотой 645 км. КА на основных орбитах распределены в 6 равноудаленных друг от друга орбитальных плоскостях по 11 КА в каждой плоскости (рис. 2). Угловой разнос между КА в одной плоскости составляет примерно $32,7^\circ$. Соседние орбитальные плоскости разнесены примерно на $31,6^\circ$, а разнос между 1-ой и 6-ой плоскостями составляет $22,1^\circ$. Период обращения – 100 мин 28 с.

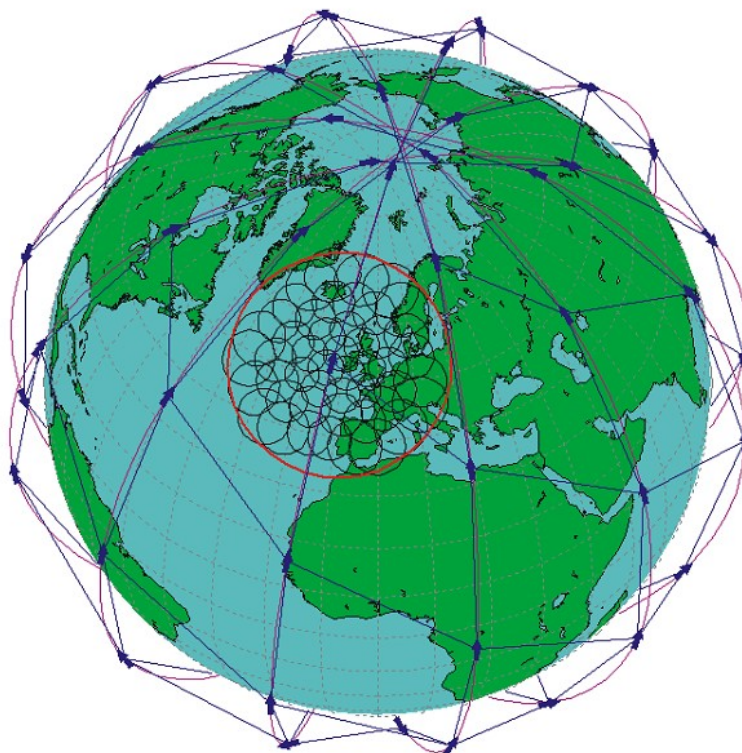


Рис. 2. Орбитальная группировка ССС Iridium
и пример формирования лучей одним из КА на поверхности Земли

Уникальным элементом ССС Iridium, отличающим ее от других ССС, является наличие межспутниковой связи, соединяющей каждый КА с 4-мя соседними – 2-мя КА, расположенными спереди и сзади в той же орбитальной плоскости, и 2-мя КА, расположенными слева и справа в соседних орбитальных плоскостях.

Система управления и контроля состоит из основного и резервного центров управления и контроля ССС Iridium, которые расположены соответственно в США и Италии. Центр управления, не принимая участия в процессе установления соединений в ССС, обеспечивает управление состоянием отдельных КА и ОГ в целом. Кроме того, центр управления передает на станции сопряжения (СС) информацию о положении КА, обеспечивает распределение связного радиоресурса КА и управление ССС в критических ситуациях. Связь КА и Центра управления осуществляется через антенные посты слежения и передачи данных, расположенные в США, Канаде и Исландии.

Сегмент шлюзовых станций обеспечивает выход АТ Iridium на наземные сети связи общего пользования, а также их роуминг в сотовых сетях. Шлюзовая станция осуществляет обработку и контроль вызовов, например, идентификацию АТ и управление доступом, применительно ко всем вызовам. Шлюз обеспечивает связь между ССС Iridium и наземными сетями связи, такими как наземные телефонные сети общего пользования (PSTN) и сети передачи данных с коммутацией пакетов общего пользования (PSDN), а также связь через наземные антенны с антеннами шлюзовых фидерных линий на КА. Шлюзовая станция располагает базой данных АТ, используемой для обработки вызовов, ведет подробный мониторинг всех вызовов АТ для выставления счетов. В состав этого сегмента входит 13 шлюзовых станций, расположенных в следующих городах: Бангкок (Таиланд), Пекин (Китай), Бомбей (Индия), Джеда (Саудовская Аравия), Фучино (Италия), Дюссельдорф (Германия, биллинговый центр относится к станции сопряжения Фучино), Москва (Россия), Нагано (Япония), Феникс (США), Мехико (Мексика, биллинговый центр относится к станции сопряжения Феникс), Рио-де-Жанейро (Бразилия), Сеул (Южная Корея), Тайбей (о. Тайвань). Планируется, что в дальнейшем общее количество шлюзовых станций в процессе активной эксплуатации ССС Iridium возрастет до 22-25 шт.

Система Iridium предоставляет следующие связные услуги:

1) основные услуги:

- услуга всемирной спутниковой связи;
- услуга всемирного роуминга;
- услуга всемирного пейджинга;
- услуга всемирной телефон-карты;

2) дополнительные услуги:

- личный почтовый ящик;
- передача коротких цифровых сообщений;
- голосовая почта (общее время записи до 7 мин);
- короткие текстовые сообщения (до 160 знаков на телефон только стандарта GSM или до 200 знаков на пейджер);
- переадресация вызовов;
- блокировка вызовов;
- конференцсвязь;
- вызов экстренной помощи.

Данные услуги реализуются посредством представления следующих технических сервисов.

1. OpenPort – высокоскоростная передача данных и голоса. Сервис разработан специально для экипажей кораблей и воздушных судов. Обеспечивает надежную телефонную связь при подключении одновременно до 3 телефонных аппаратов. Скорость передачи данных достигает 128 кбит/с.
2. Burst – данный сервис позволяет отправлять сообщения и данные множеству АТ устройств одновременно. Причем отправитель имеет возможность выбрать из списка контактов тех получателей, которым

- адресуется сообщения, а также указать географическое расположение группы получателей или координаты их местонахождения.
3. SMS (Short Message Service) – сервис передачи коротких текстовых сообщений. Сообщение будет доставлено получателю даже если в момент отправки абонентский терминал получателя был отключен. При включении устройства сообщения придут автоматически.
 4. RUDICS (Router-Based Unrestricted Digital Interworking Connectivity Solution) – сервис передачи данных с коммутацией каналов от множества различных устройств. Основан на установлении коммутируемого соединения от АТ через КА до шлюзовой станции путем организацией сквозного IP-соединения. После аутентификации АТ вызов RUDICS направляется по целевому IP-адресу и порту в сети Интернет. RUDICS поддерживает следующие типы транспортных услуг: инкапсуляцию абонентских данных в TCP/IP протокол, поддержка протоколов «точка-точка» PPP и MLPPP.
 5. Netted Iridium – сервис совмещает возможности местоопределения АТ и передачу голоса в режиме Push-to-Talk. Обеспечивает установление голосового соединения менее чем за 2 с в полудуплексном режиме на предопределенных АТ, включенных в сеть.
 6. SBD (Short Burst Data) – сервис оперативной передачи небольших пакетов данных размером от 10 байт до 1960 байт. Среднее время доставки – 5 с. Применяется в различных M2M-приложениях для мониторинга кораблей, автотранспорта, поездов и т. д.

Основные технические характеристики CCC Iridium представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики CCC Iridium

Наименование параметра	Значения параметра
Число КА	66 (6 резервных)
Число орбит/КА на орбите	6/11
Тип орбиты/ Высота орбиты, км	LEO/780
Наклонение орбиты, град.	86,4
Период обращения, сек.	6028
Зона обслуживания	глобальная
Вид связи, предоставляемый АТ	ТЛФ, ПД, факс
Скорость передачи, кбит/с	2,4
Суммарная мощность передатчиков КА, Вт	120
Количество парциальных лучей от каждого КА	48
Число каналов на КА	2500
Метод мультиплексирования	МДВР/МДЧР
Метод дуплексирования	временное
Способ связи между зонами	межспутниковая связь
Вид модуляции	QPSK

Диапазон частот работы: ШС → КА, ГГц	29,1...29,3
КА → ШС, ГГц	19,4...19,6
АТ ↔ КА, ГГц	1,616...1,6265
Пейджинг, ГГц	1,6264375; 1,626395833; 1,626145833; 1,626104167
КА → КА, ГГц	23,18...23,38

Основные тактико-технические характеристики (ТТХ) КА и АТ.

1) ТТХ ретранслятора КА линии «вниз» на АТ в L-диапазоне:

- подспутниковая зона радиовидимости – диаметр 4000 км;
- подспутниковая зона обслуживается 48 сотовыми ячейками (лучами), диаметр ячейки – 650 км, время радиовидимости в зоне КА – 9-10 мин, в пятне конкретного луча – до 1,5 мин;
- диапазон рабочих частот – 1616-1626,5 МГц, используется в режиме временного дуплекса («вниз» и «вверх» на одной рабочей частоте луча), на линии «вниз» также выделены 4 частоты для радиопейджинга: 1626,104167; 1626,145833; 1626,395833 и 1626,4375 МГц;
- многостанционный доступ: множественный доступ с частотным разделением (МДЧР) / множественный доступ с временным разделением (МДВР). При этом МДВР в режиме временного дуплекса в каждой субполосе частот обеспечивает 4 канала со скоростью 2,4 кбит/с на канал; с учетом временного дуплекса в кадре 8 временных окон (по 4 на прием и передачу) по 8,28 мс, с учетом служебной информации кадр МДВР имеет длительность 90 мс; с учетом 4-кратного повтора по частоте (4 кластера) в многостанционном доступе МДЧР реализуется 48 частотных каналов (лучей, ячеек).

2) ТТХ ретранслятора КА межспутниковой линии в К-диапазоне:

- диапазон рабочих частот – 23,18-23,38 ГГц, полоса частот межспутниковой линии – 20 МГц;
- число направлений связи (межспутниковая связность) – 4;
- скорость передачи данных – 25 Мбит/с;
- число частотных каналов – 8 (по 2 на прием/передачу в каждом направлении);
- разнос между каналами – 2,5 МГц (8 каналов в полосе 20 МГц);
- ЭИИМ – 37,9 дБВт;
- коэффициент G/T: -5,3 дБ/К.

3) ТТХ ретранслятора КА фидерной линия «вниз» на ШС в К-диапазоне:

- диапазон рабочих частот – «вниз» 19,4-19,6 ГГц, «вверх» 29,1-29,3 ГГц;
- число каналов на несущей – 480, число несущих – до 4, общее число каналов – до 1920;
- мощность передатчика – 1 Вт;
- ЭИИМ: 13,5-23,2 дБВт;

- коэффициент G/T: -1 дБ/К.

4) ТТХ шлюзовых станций сопряжения, работающих на фидерных линиях в К-диапазоне:

- 4 типа узловых станций с канальной емкостью 30, 60, 90 и 120 тыс. АТ;
- скорость передачи – 12,5 Мбит/с;
- число одновременно отслеживаемых КА для передачи/приема данных – 3;
- ЭИИМ (ФМ-4): 68 дБВт (высокоскоростной режим);
- коэффициент G/T: 24,5 дБ/К.

5) ТТХ ретранслятора АТ для передачи трафика по линии «вверх» (двух-режимный АТ Iridium/GSM) в L-диапазоне:

- скорость речевого кодека VSELP и передачи данных – 2,4 кбит/с;
- помехоустойчивое кодирование – сверточный код ($r=3/4$, $k=7$);
- канальная скорость передачи с учетом уплотнения – 180 кбит/с, приема – 400 кбит/с;
- вид модуляции – ФМ-4 (QPSK) со сглаживанием;
- полоса несущей частоты – 31,5 кГц с разносом 41,667 кГц
- ЭИИМ: 5,9-8,8 дБВт, ретранслятора АТ: 7,5-27,7 дБВт;
- коэффициент G/T: -23 дБ/К, ретранслятора АТ: -4,4 дБ/К;
- шумовая температура – 533 К;
- антенна – четырехзаходная спираль;
- масса – 700 гр. (портативный АТ), 2,5 кг (мобильный АТ);
- протоколы вызова и регистрации соответствуют сети GSM.

В 2018 г. ССС Iridium завершил процесс полного обновления орбитальной группировки путем перехода на КА следующего поколения «Iridium NEXT». При этом прежними остались используемый частотный ресурс и принципы построения ССС, а бортовая аппаратура КА нового поколения в дополнение к существующим режимам поддерживает новые форматы сообщений и протоколы связи на основе IP. Внедрение IP-архитектуры и современных алгоритмов уплотнения позволило более чем в 10 раз увеличить общую пропускную способность каналов связи, а также обеспечить высокую гибкость предоставления услуг связи пользователям, в частности, развертывать распределенные частные сети VSAT (Very Small Aperture Terminal) в глобальном масштабе.

Новые КА «Iridium NEXT», как и КА предыдущего поколения, оснащаются 3-мя комплектами антенн. Основная антенна – активная фазированная антенная решетка (АФАР) имеет на 25% меньшие размеры по сравнению с используемой на КА типа «Iridium». В качестве дополнительной полезной нагрузки на КА «Iridium NEXT» установлены:

- аппаратура ADS-B для контроля и управления движением летательных аппаратов, в том числе беспилотных, в реальном масштабе времени;
- аппаратура AIS для автоматической идентификации и мониторинга морского транспорта;
- аппаратура GEOScan для изучения атмосферы и гравитационного поля Земли.

Сравнительный анализ ТТХ ССС Iridium на основе КА предыдущего типа и на основе КА «Iridium NEXT» приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительный анализ ТТХ КА Iridium

	КА «Iridium»	КА «Iridium NEXT»
Диапазоны частот радиотрасс	без изменений	
Скорость передачи данных в различных режимах, кбит/с:		
- телефония	2,4	2,4
- низкоскоростная передача данных	2,4	9,5-64
- передача данных морским и воздушным объектам	до 134	128-512
- широкополосная передача данных	–	64
- высокоскоростная передача данных	–	88; 176; 352; 704; 1408
Мощность системы электропитания, кВт	1,2	22
Расчетный срок эксплуатации КА, лет	8	15
Масса, кг	689	860

Необходимо отметить, что ССС Iridium широко используется государственными и силовыми ведомствами США. При этом министерство обороны США ежегодно арендует 20-40% ресурса ССС Iridium для собственных нужд и восполнения потребностей в глобальном обслуживании специальных потребителей. Для оптимального использования ССС в своих интересах министерство обороны США организовало и постоянно использует собственную спутниковую станцию, расположенную на о. Вахиав (шт. Гавайи), которая дает возможность абонентам военного ведомства, с одной стороны, работать изолированно только в сетях специальной связи, а, с другой, – выходить при необходимости в любые другие коммерческие сети, включая сеть Интернет. В то же время, эта спутниковая станция позволяет контролировать весь проходящий через систему трафик.

2. Организации связи в ССС Iridium

2.1. Организация зон и лучей обслуживания каналообразующим оборудованием КА Iridium

На каждом КА Iridium установлены 3 группы антенн:

- 6 АФАР, формирующих 48 парциальных лучей для работы с АТ на прием и передачу в диапазоне 1616-1626,5 МГц;
- 4 антенны для организации связи со станциями сопряжения в диапазоне 19,4-19,6 ГГц и 29,1-29,3 ГГц;
- 4 волноводно-щелевые антенны для межспутниковой связи в диапазоне 23,18-23,38 ГГц.

Каждый КА формирует зону обслуживания АТ диаметром 4700 км и площадью около 19 млн. км². Зоны обслуживания КА разделены на сотовые ячейки – до 48 на один КА. В связи с этим, на КА использована 48-лучевая ан-

тенная система, состоящая из 6 АФАР, каждая из которых формирует 8 лучей. Один луч высвечивает на поверхности Земли зону обслуживания диаметром порядка 600 км. В совокупности 48 лучей формируют квазисплошную подспутниковую зону диаметром более 4000 км.

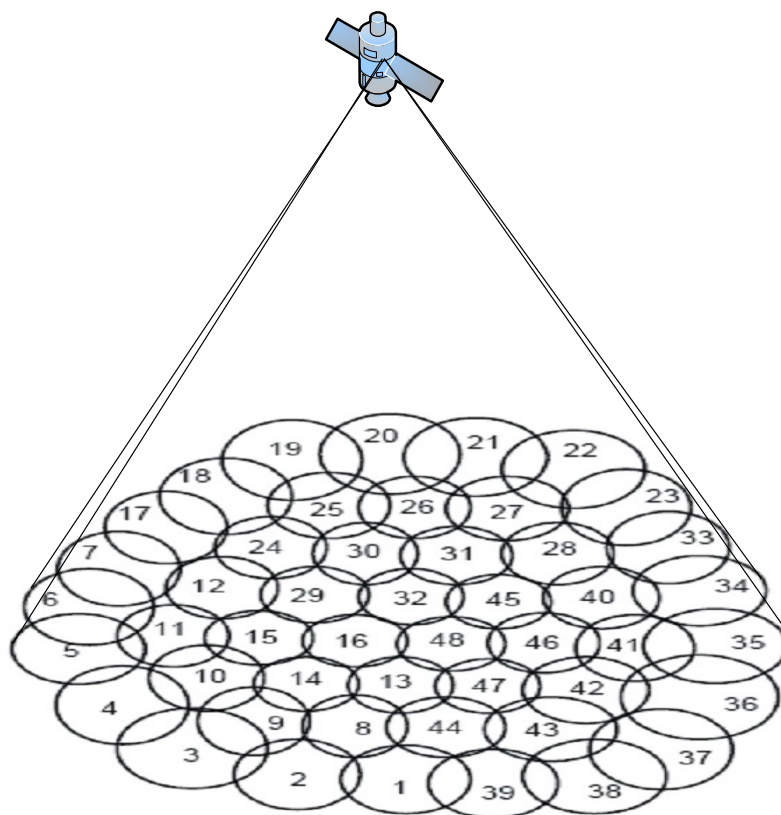


Рис. 3. Формирование 48-лучевой подспутниковой зоны

Одним из ключевых аспектов в ССС Iridium является механизм «хэндовера» – передачи АТ из луча в луч (из одной соты в другую), а также с одного КА на другой. При максимальном времени пребывания абонента в зоне радиовидимости одного КА порядка 8-10 мин и при 48 лучах на каждом КА интенсивность переходов может составить до 1 раза в минуту (время радиовидимости в зоне – 9-10 мин., в ячейке – до 1,5 мин). Учитывая то, что в соседних лучах используются разные рабочие частоты, процедура перехода в новую зону (соту) должна повлечь за собой и смену рабочей частоты абонентского терминала, т. е. в системе применяется достаточно сложный алгоритм переключения рабочих частот наземных терминалов.

Диаграммы направленности АФАР задаются программным способом, что позволяет независимо изменять параметры каждого луча и, в свою очередь, избежать перекрытия зон от смежных КА.

Околополярные орбиты КА обеспечивают более близкое расположение КА по мере увеличения суборбитальной широты, (рис. 2). В свою очередь, такое орбитальное построение обуславливает увеличение перекрытия зон соседних КА по мере их приближения к полюсам. Для уменьшения межспутниковых помех и согласования нагрузки между КА в высоких широтах производится выборочное отключение внешних лучей в зонах каждого КА.

Помимо абонентских линий в ССС Iridium организуются фидерные и межспутниковые линии связи, а также каналы для обмена командно-телеметрической информацией (таблица 3).

Таблица 3 – ТТХ линий связи ССС Iridium

ТТХ радиолинии	Абонентские линии		Фидерные линии		Межспутниковые линии
	«вверх»	«вниз»	«вверх»	«вниз»	
Диапазон частот	1616-1626,5 МГц		29,1-29,3 ГГц	19,4-19,6 ГГц	23,18-23,38 ГГц
Полоса частот базового канала в линии	31,5 кГц		2,5 МГц		20 МГц
Скорость передачи в линии	180 кбит/с	400 кбит/с	12,5 Мбит/с	12,5 Мбит/с	25 Мбит/с
ЭИИМ, дБВт	5,9-8,8	12,4-31,2	51,4-77,4	14,5-27,5	37,9
Сигнал	QPSK (ФМ-4)				

2.2. Каналообразующие оборудование абонентских терминалов Iridium

В состав системы Iridium входят два основных типа абонентских терминалов: мобильные и портативные.

В стандартном АТ используется антенна типа четырехзаходная спираль с коэффициентом усиления 1-3 дБ. Антенна обеспечивает прием радиосигналов в секторе углов 360° по азимуту и от 10° до 90° по углу места. Максимальная ЭИИМ абонентской станции равна 5,9-8,8 дБВт. Добротность приемника G/T лежит в пределах от -23,8 до -21,8 дБ/К (шумовая температура 553°К). Пороговое отношение сигнал-шум равно 3,1 дБ при вероятности ошибки 10^{-2} .

Отдельные АТ (оборудование AES AMS(R)S Iridium) устойчиво работает в условиях помех, вызывающих совокупное относительное изменение шумовой температуры приемника ($\Delta T/T$) на 25%. Увеличение шумовой температуры приемника на 25% эквивалентно снижению энергетического запаса линии связи на 1,0 дБ. Это дополнительное снижение вследствие помех учитывается в энергетическом бюджете линии связи ССС Iridium. Абонентские каналы рассчитаны на обеспечение энергетического запаса в 15 дБ.

2.3. Организация каналов связи

Каждый канал связи в ССС Iridium определяется назначенными ему несущей частотой и временным слотом. Далее под термином «канал» будет всегда подразумевается именно сочетание временного слота и несущей частоты. Под терминами «частота» или «доступ с частотным разделением» будет пониматься конкретная радиочастота отдельного канала.

Все каналы в ССС Iridium можно разделить на две основные категории:

1) служебные каналы – обеспечивают функционирование ССС и обслуживание в них АТ. В данную категорию входят:

- каналы вызова;
- радиовещательные каналы;
- каналы обнаружения сигнала;
- каналы синхронизации;

2) абонентские каналы – сервисные каналы, посредством которых предоставляются услуги связи:

- каналы трафика:
 - дуплексные речевые каналы;
 - совмещенные дуплексные каналы для передачи речи и данных;
 - дуплексные каналы передачи данных;
- каналы передачи сообщений.

Определенное сочетание временного слота и несущей частоты может использоваться для нескольких типов каналов в зависимости от конкретного вида обслуживания в каждом случае. При этом каждое конкретное сочетание временного слота и несущей частоты используется только для одной цели.

На рис. 4 приведена иерархия каналов CCC Iridium.

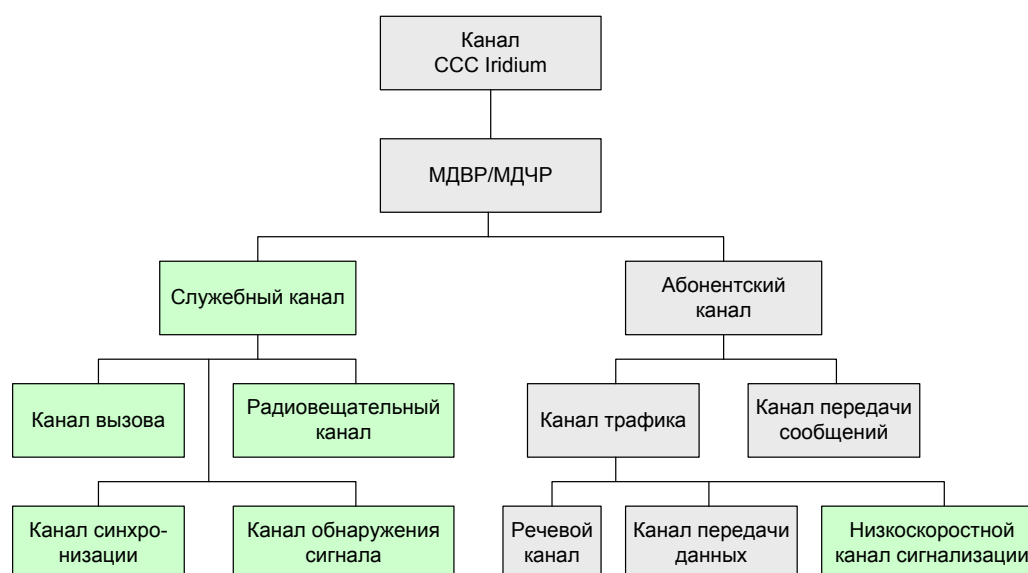


Рис. 4. Иерархия каналов CCC Iridium

2.3.1 Служебные каналы

CCC Iridium располагает 4-мя типами служебных каналов:

- 1) канал вызова;
- 2) радиовещательный канал;
- 3) канал обнаружения сигнала;
- 4) канал синхронизации.

Канал вызова представляет собой канал связи в линии «вниз», используемый для передачи сообщений вызова отдельным АТ. Несущая частота канала вызова является единственной для использования во всей CCC Iridium. В канале вызова используется МДВР для передачи сообщений вызова различным АТ на данной единой частоте.

Радиовещательные каналы представляют собой каналы связи в линии «вниз», используемые для управления обнаружением сигналов КА абонентами и передачи им команд управления. По этим каналам на АТ передается информация о частотах и синхронизации в системе, прежде чем они приступят к передаче запроса обнаружения сигнала. Кроме того, радиовещательные каналы обеспечивают передачу сообщений по линии связи «вниз», в которых КА осуществляют присвоение каналов для АТ и подтверждают сообщения АТ об обнаружении сигнала. Также радиовещательные каналы используются для выборочного блокирования обнаружения сигнала отдельными АТ в целях предотвращения перегрузки КА.

Каналы обнаружения сигнала представляют собой каналы связи в линии «вверх», которые используются оборудованием отдельных АТ для передачи на КА сообщений об обнаружении сигнала. В этих каналах используется принцип случайного МДВР по протоколу Aloha. Допуски на погрешности по времени и частоте в канале обнаружения сигнала несколько больше в расчете на неопределенности первоначального выделения частоты и синхронизации. Каждый из АТ самостоятельно определяет, какие каналы обнаружения сигнала являются активными посредством мониторинга радиовещательного канала.

Канал синхронизации представляет собой дуплексный канал, используемый АТ для обеспечения окончательной синхронизации с КА до того как он задействует абонентский канал для передачи речи или трафика. Канал синхронизации занимает те же частотно-временные параметры (номер временного слота и частоты доступа), что и абонентский канал, который будет занят АТ после завершения процесса синхронизации. Во время процесса синхронизации КА замеряет относительное время и относительную частоту поступления пакета синхронизации от АТ по линии связи «вверх» и направляет к АТ корректирующую информацию в пакете синхронизации по линии «вниз». Параметры канала синхронизации присваиваются КА каждому АТ перед началом передачи им трафика. Процедура синхронизации выполняется АТ, передающим пакет по линии связи «вверх», который оценивается КА на предмет временной и частотной погрешности в присвоенном канале. При этом КА направляет АТ по каналу связи «вниз» временные и частотные поправки к последнему пакету, переданному АТ по линии связи «вверх». Этот процесс повторяется до тех пор, пока КА не определит, что время и частота передачи АТ находятся в установленных для абонентского канала допусках. После этого КА передает на АТ сообщение о соответствии канала установленным требованиям, изменяет статус данного канала на «абонентский канал» и начинает передачу по нему трафика.

2.3.2 Абонентские каналы

В интересах непосредственного предоставления услуг связи пользователям для АТ в CCC Iridium организуется абонентский канал связи. В CCC Iridium предусмотрено 2-а основных типа абонентских каналов:

- 1) каналы передачи сообщений;
- 2) каналы трафика.

2.3.2.1. Каналы передачи сообщений

Каналы передачи сообщений поддерживают только услугу симплексной передачи сообщений между АТ. Эта услуга обеспечивает передачу коротких цифровых и буквенно-цифровых сообщений на АТ и пейджеры Iridium.

2.3.2.2. Каналы трафика

Каналы трафика поддерживают услуги дуплексной связи, в том числе дуплексную телефонную связь, а также разнообразные виды дуплексной передачи данных. Каждый канал трафика представляет собой соответствующий канал связи «вверх» и «вниз». АТ дуплексной связи имеет исключительное право на занятие присвоенных ему каналов до прекращения обслуживания или до переключения АТ на другой канал.

Структура пакета в канале трафика одинакова для линии «вверх» и линии «вниз». Каждый пакет имеет длительность 8,28 мс и содержит 414 канальных символов. Пакет имеет четыре поля:

- преамбула;
- кодовое слово;
- слова управления линии (СУЛ);
- поле полезной нагрузки.

Преамбула и кодовое слово различны для пакетов линий «вверх» и «вниз» и используются в приемном демодуляторе для обнаружения пакета.

Поле СУЛ содержит три слова, закодированных кодами БЧХ (7, 3), БЧХ (13, 6) и БЧХ (26, 21). Поток данных полей СУЛ образует низкоскоростной канал сигнализации со скоростью 222,2 бит/с, который используется для поддержки линии связи, управления линией и переключения АТ («хэндовера»). Поле СУЛ кодируется кодом с прямым исправлением ошибок (FEC).

Поток данных полей полезной нагрузки составляет 3466,67 бит/с. С учетом потерь на кодирование и дополнительные служебные сообщения обеспечивается средняя скорость передачи данных абонента 2400 бит/с. Это основной канал передачи пользовательского трафика, а также передачи данных и сигнальных сообщений.

Данными могут быть либо преобразованные вокодером речевые сигналы, либо трафик пользователя. При речевой связи собственный вокодер Iridium использует кодирование FEC для обеспечения хороших или удовлетворительных по качеству характеристик, преобразованных вокодером речевых сигналов. При передаче трафик пользователя протокол канального уровня L-диапазона использует последовательность проверки кадров для обеспечения по существу безошибочной передачи данных.

2.3.3. Уплотнение каналов

Каналы в CCC Iridium реализуются путем применения гибридного МДВР/МДЧР (TDMA/FDMA) многостанционного доступа. Отдельные каналы повторно используются в различных пространственно-разнесенных лучах подспутниковой зоны одного КА. Каждый канал идентифицируется несущей частотой и временной слотом в кадре.

2.3.3.1. Временное уплотнение каналов

Основными элементами МДВР являются временные слоты, переносящие пакеты, объединяемые в кадры. Организация временных слотов в кадрах МДВР-канала приведена на рис. 5.

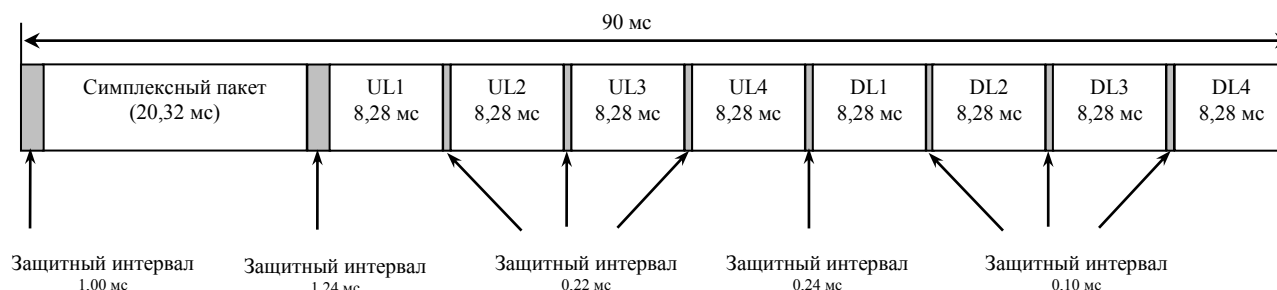


Рис. 5. Структура кадра при МДВР

Каждый МДВР кадр состоит из симплексного пакета, 4 пакетов линии «вверх» (UL1...UL4) и 4 пакетов линии «вниз» (DL1...DL4). Для исключения временного наложения пакетов вследствие ресинхронизации КА и АТ в кадре предусматриваются защитные временные интервалы, уменьшающие эффективность МДВР до 73%. Каждый кадр TDMA содержит 2250 символов при частоте модуляции пакетного канала 25 килосимволов в секунду (ксимв/с).

Симплексный пакет используется для передачи сообщений (в канале передачи сообщений) и для формирования служебного канала вызова в линии «вниз».

Служебные каналы обнаружения сигнала и синхронизации, а также каналы трафика «вверх» формируются путем использования временных слотов UL1...UL4 в линии «вверх». Служебные каналы радиовещания и синхронизации, а также каналы трафика «вниз» формируются путем использования дуплексных временных интервалов DL1...DL4 в линии «вниз».

В канале трафика со скоростью 2400 бит/с используется один временной слот по линии «вверх» и один временной слот по линии «вниз» на кадр. При этом временные слоты линии «вверх» и линии «вниз» необязательно могут находиться на одной частоте. В системе может быть организован канал трафика 4800 бит/с, используя 1 и 2, либо 3 и 4 временные окна линий «вверх» и «вниз», причем пара соседних временных окон «вверх» или линии «вниз» должны быть на одной частоте.

2.3.3.2. Частотное уплотнение каналов

Основными единицами в структуре частотного плана МДЧР в CCC Iridium является несущая частота с полосой 41,667 кГц. Каждый канал использует одну несущую частоту. Все несущие частоты делятся на два поддиапазона:

- поддиапазон дуплексных несущих частот;
- поддиапазон симплексных несущих частот.

2.3.3.1.1. Поддиапазон дуплексных несущих частот

Диапазон частот от 1616,0 МГц до 1626,0 МГц предназначен для сигналов дуплексных каналов. Несущие частоты, предназначенные для дуплексных каналов, разделены на 30 групп по 8 несущих частот. Каждая несущая частота имеет ширину 31,5 кГц с разносом 41,667 кГц (см. рис. 6). Каждая группа занимает полосу 333,333 кГц ($8 \times 41,667$ кГц). Таким образом, всего определено 240 несущих частот для организации дуплексных каналов.

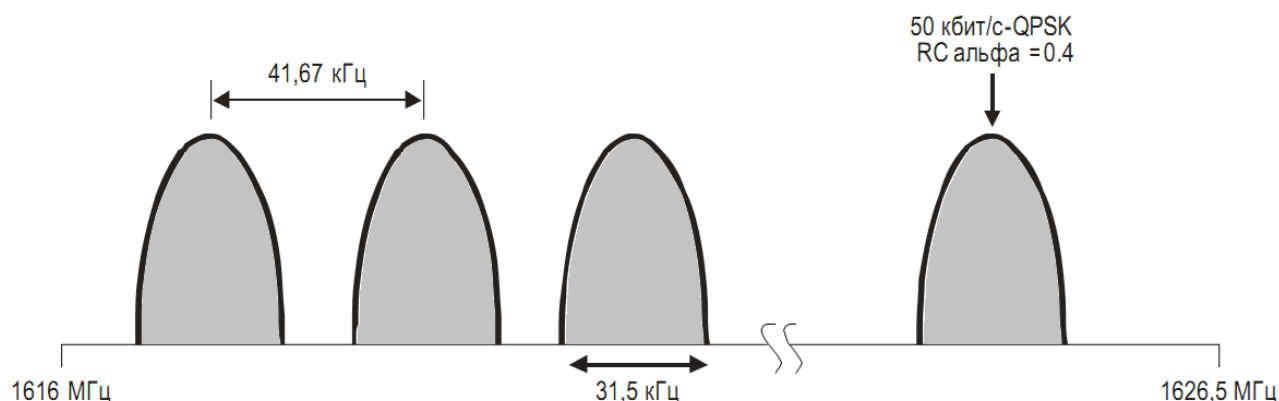


Рис. 6. Структура МДЧР

В таблице 3 представлены данные о границах каждой из 30 групп несущих частот. На 2011 г. в ССС Iridium использовались несущие частоты в группах 8-30.

Таблица 3 – Распределение групп частот дуплексных каналов

Группа несущих частот	Нижняя граница (МГц)	Верхняя граница (МГц)
1	1 616,000000	1 616,333333
2	1 616,333333	1 616,666667
3	1 616,666667	1 617,000000
4	1 617,000000	1 617,333333
5	1 617,333333	1 617,666667
6	1 617,666667	1 618,000000
7	1 618,000000	1 618,333333
8	1 618,333333	1 618,666667
9	1 618,666667	1 619,000000
10	1 619,000000	1 619,333333
11	1 619,333333	1 619,666667
12	1 619,666667	1 620,000000
13	1 620,000000	1 620,333333
14	1 620,333333	1 620,666667
15	1 620,666667	1 621,000000
16	1 621,000000	1 621,333333
17	1 621,333333	1 621,666667
18	1 621,666667	1 622,000000

19	1 622,000000	1 622,333333
20	1 622,333333	1 622,666667
21	1 622,666667	1 623,000000
22	1 623,000000	1 623,333333
23	1 623,333333	1 623,666667
24	1 623,666667	1 624,000000
25	1 624,000000	1 624,333333
26	1 624,333333	1 624,666667
27	1 624,666667	1 625,000000
28	1 625,000000	1 625,333333
29	1 625,333333	1 625,666667
30	1 625,666667	1 626,000000

В CCC Iridium многократно используются несущие частоты дуплексных каналы в различных лучах подспутниковой зоны при наличии достаточных условий для их пространственного разнеса. Отдельные несущие частоты объединяются в группы, которые могут использоваться многократно в различных пространственно-разнесенных лучах. Такая группа состоит из одного временного интервала и восьми смежных несущих частот. При этом несущие частоты нумеруются от 1 до 8 от нижней до верхней частоты.

В таблице 4 представлены нижние, верхние и центральные частоты для каждого из восьми несущих частот в пределах группы многократного использования. Эти частоты соотносятся с нижней границей каждой группы частот, представленных в таблице 3.

Таблица 4 – Частотные параметры для каждой из восьми несущих частот в пределах группы

Номер несущей частоты в группе	Нижняя частота (кГц)	Верхняя частота (кГц)	Центральная частота (кГц)
1	0,000	41,667	20,833
2	41,667	83,333	62,500
3	83,333	125,000	104,167
4	125,000	166,667	145,833
5	166,667	208,333	187,500
6	208,333	250,000	229,167
7	250,000	291,667	270,833
8	291,667	333,333	312,500

Группы частот многократного использования могут присваиваться лучу, переприсваиваться или активироваться/деактивироваться в начале каждого временного кадра. Для обеспечения дополнительной пропускной способности тех лучей, которые испытывают большую нагрузку, используется динамичное присвоение этому лучу нескольких групп несущих частот.

2.3.3.1.2. Поддиапазон симплексных несущих частот

Диапазон частот 1626-1626,5 МГц шириной 500 кГц содержит 12 несущих частот (по 41,667 кГц), предназначенных для симплексных каналов в линии «вниз». Каналы нумеруются от 1 (наименьшее значение частоты) до 12 (наибольшее значение частоты). В линии «вниз» выделены 4-е несущие частоты радиопейджинга: 1626,104167; 1626,145833; 1626,395833 и 1626,4375 МГц.

Отметим, что на несущей частоте 1626,270833 МГц в ССС Iridium организуется единый для всей ССС служебный канал вызова. Внутри данного канала вызываемые АТ разделяются по времени.

Таблица 5 – Распределение симплексных несущих частот

Номер канала	Центральная частота (МГц)	Функциональная нагрузка
1	1 626,020833	Резервный канал
2	1 626,062500	Резервный канал
3	1 626,104167	4-ый канал передачи сообщений
4	1 626,145833	3-ий канал передачи сообщений
5	1 626,187500	Резервный канал
6	1 626,229167	Резервный канал
7	1 626,270833	Вызов
8	1 626,312500	Резервный канал
9	1 626,354167	Резервный канал
10	1 626,395833	2-ой канал передачи сообщений
11	1 626,437500	1-ый канал передачи сообщений
12	1 626,479167	Резервный канал

2.3.4. Сигнально-кодовые конструкции и способы регулирования мощности в каналах связи

2.3.4.1. Сигналы в каналах связи

Во всех каналах линий «вверх» и «вниз» в L-диапазоне в ССС Iridium используются вариации четырехпозиционной фазовой манипуляции (QPSK) с частотой 25 kilosимволов в секунду (ксимв/с), при этом они реализуются посредством формирования сигнала типа «приподнятый косинус» с 40% эффективной амплитудой. К вариациям QPSK относятся дифференциальное кодирование (DE-QPSK) и двухпозиционная фазовая манипуляция (BPSK), которая здесь рассматривается как особый случай QPSK.

В абонентских каналах, а также служебных каналах радиовещания, синхронизации, вызова и передачи сообщений в линии «вниз» используется модуляция DE-QPSK с формированием импульсного сигнала типа «квадратичного приподнятого косинуса» с 40% эффективной амплитудой. Во всех этих каналах скорость передачи данных составляет 25 ксимв/с или 50 кбит/с.

В абонентских каналах в линии «вверх» используют модуляцию DE-QPSK с формированием импульсного сигнала типа «квадратичного приподнятого косинуса» с 40% эффективной амплитудой. Скорость передачи данных составляет 25 ксимв/с или 50 кбит/с.

Каналы обнаружения сигнала и синхронизации в линии «вверх» используют модуляцию DE-BPSK с формированием импульсного сигнала типа «квадратичного приподнятого косинуса» с 40% эффективной амплитудой. Скорость передачи данных составляет 25 ксимв/с или 25 кбит/с. Сигнал BPSK используется в связи с тем, что он обеспечивает выигрыш на линии «вверх» в 3 дБ и тем самым повышает вероятность обнаружения сигнала.

2.3.4.2. Кодирование в каналах связи

Способ кодирования, используемый в каналах связи в линиях «вверх» и «вниз» – дифференциальное кодирование. Его использование позволяет демодуляторам в случае кратковременной потери фазовой синхронизации вследствие замирания сигнала на линии вновь быстро выделить фазу и устранить фазовую неоднозначность.

Используемый способ кодирования не обеспечивает прямое исправление ошибок в данных абонента, переданных в полезной нагрузке. Целостность таких данных обеспечивается путем добавления 24-битовой контрольной последовательности проверки кадра, передаваемой в каждом пакете, содержащем в качестве нагрузки данные (в отличие от полезной речевой нагрузки). Если после проверки кадра не подтверждается их целостность, протокол канального уровня запрашивает этот кадр повторно. При этом ошибочные данные полезной нагрузки, которые не прошли проверку целостности, не передаются конечному абоненту. Следовательно, ухудшение качества канала, которое обуславливает увеличение коэффициента битовых ошибок в абонентском канале, приводит к увеличению числа повторных ретрансляций кадров и соответствующему сокращению числа генерируемых пользователем битов, передаваемых конечному абоненту. Передача данных в ССС Iridium рассчитана на обеспечение минимальной пропускной способности данных пользователя в 2400 бит/с.

Отдельные прикладные процессы сигнализации, управления и передачи трафика используют собственные варианты помехоустойчивого кодирования с исправлением ошибок для улучшения коэффициента битовых ошибок в каналах связи. Алгоритм вокодера использует собственное чередование и прямое исправление ошибок. Большинство административных передач, используемых для предоставления доступа к линии и осуществления контроля, используют собственное исправление внутренних ошибок и чередование.

2.3.4.3. Способы регулирования мощности в каналах связи

Для каналов связи в линиях L-диапазона пороговое значение битовой ошибки может составлять до 0,02, что является достаточным для обеспечения речевой связи. Этот уровень обеспечивается при значении отношения мощностей сигналов/помеха (ОСШ) в 6,1 дБ в условиях прямой видимости. Система Iridium может работать с энергетическим запасом на линии связи, превышающим данный уровень на 15,5 дБ. Этот запас необходим для компенсации ослабления замирания сигнала вследствие рэлеевского переотражения и затенения, типичных при работе мобильного АТ в городских условиях. При удовлетворительных условиях на канале этот уровень снижается благодаря адаптивному регулированию мощности. Однако даже при адаптивном регулировании мощности энергетический запас в линии связи сохраняется для ослабления замираний, которые являются слишком непродолжительными, чтобы их можно было компенсировать с помощью контура регулирования мощности.

Для адаптивного регулирования мощности используется алгоритм замкнутого контура, при котором КА и приемники АТ измеряют уровень ОСШ и выдают команды передатчикам скорректировать мощность передачи до минимального значения, необходимого для поддержания высокого качества работы на линии связи. В тех случаях, когда полный энергетический запас в линии связи не требуется для смягчения условий в канале, адаптивное регулирование мощности выполняет функцию сокращения потребления мощности системы.

Имеются небольшие различия в алгоритмах регулирования мощности, используемых при передаче речи и данных. Алгоритм, используемый при передаче данных, рассчитан на более высокие уровни мощности и не использует адаптивное регулирование мощности, обеспечивая тем самым низкие коэффициенты битовых ошибок в канале и более высокую пропускную способность для пользователя.

2.4. Протоколы организации связи

Процессы установления соединения между двумя абонентами для организации связи между ними и прерывания соединения в конце вызова определяются протоколами CCC Iridium.

Функции обеспечения связи распределяются между АТ, КА и ШС. В CCC Iridium поддерживается набор протоколов, используемых для связи между элементами системы. Эти протоколы можно свести в следующие группы.

1. Протокол управления соединениями (СС).
2. Протокол управления мобильностью (ММ).
3. Протокол канального уровня L-диапазона (LL).
4. Протокол физического уровня L-диапазона (LBP).
5. Протокол канала ассоциированного управления L-диапазона (ACCHL).

Распределение процессов функционирования протоколов в АТ, КА и ШС представлено на рис. 7.

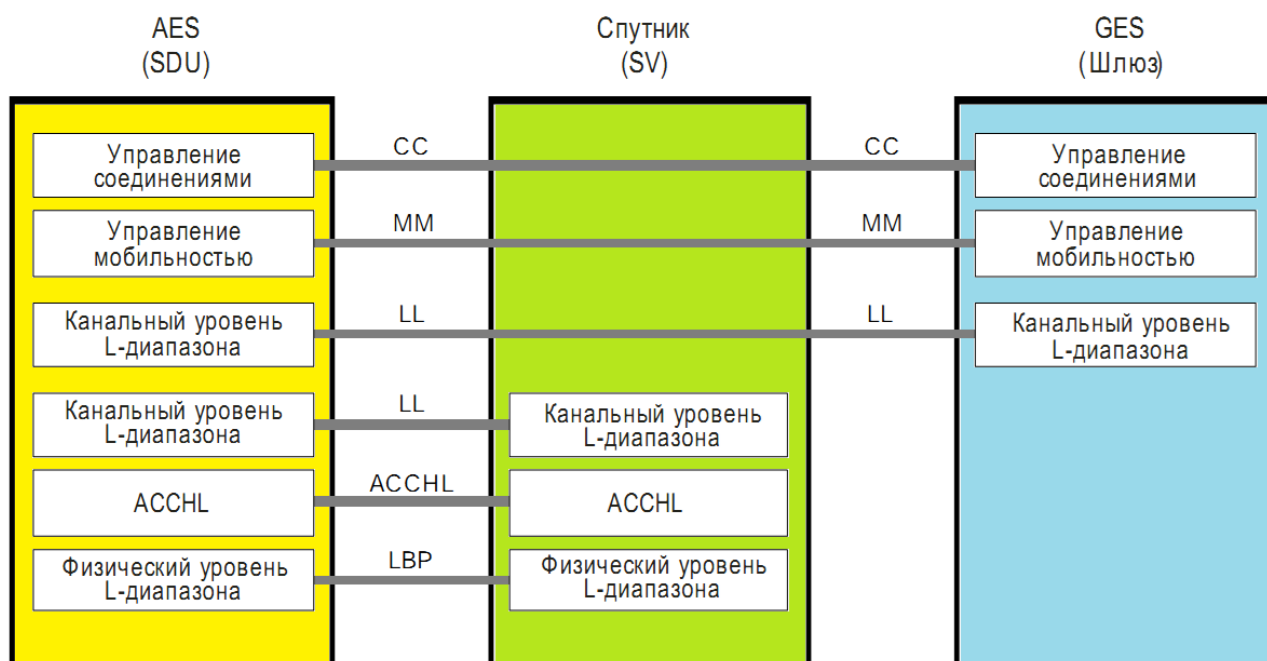


Рис. 7. Распределение процессов функционирования протоколов CCC Iridium в АТ, КА и ШС

Основной интерфейс с АТ и установка/разъединение коммутируемых каналов в CCC Iridium обеспечиваются на прикладном уровне АТ с использованием набора команд Хейза (специальный язык программирования, первоначально разработанный для модемов, используемых в телефонных линиях, также называется набором команд АТ). Для некоторых услуг передачи данных в CCC Iridium также обеспечиваются дополнительные сервисные интерфейсы для облегчения доступа АТ. В целом, канал связи CCC Iridium представляется для АТ эффективным и надежным средством передачи данных.

2.4.1. Протокол управления соединениями

Протокол CC эквивалентен протоколу управления соединениями стандарта GSM. Он включает передачу сигналов между коммутационным центром сети подвижной связи и абонентом сети подвижной связи (MSC-MS) на подуровне CC интерфейса подвижной радиосвязи GSM, а также соответствующие процедуры. Кроме того, данный протокол обеспечивает общие возможности управления телефонными соединениями, предусмотренными в стандартной коммутационной подсистеме GSM.

2.4.2. Протокол управления мобильностью

Протокол MM эквивалентен протоколу управления мобильностью в GSM. Он включает передачу сигналов MSC-MS на подуровне MM интерфейса подвижной радиосвязи GSM и соответствующие процедуры, а также элементы прикладной части подвижной связи, которые поддерживают его.

2.4.3. Протокол канального уровня L-диапазона

Протокол LL обеспечивает функции управления и контроля за абонентскими каналами, определяет приоритеты доступа АТ, обновляет системные данные, а также устанавливает и разъединяет соединения. Протокол LL обеспечивает передачу сигналов обработки исходящих и входящих вызовов АТ и обеспечивает процедуры сигнализации, связанные с доступом АТ к ССС. Кроме того, протокол LL в реальном времени обеспечивает управление радиоресурсами на канальном уровне L-диапазона, заключающимся в их распределении и поддержании между АТ и процедуры «хэндовера» АТ в процессе движения КА.

2.4.4. Протокол канала ассоциированного управления L-диапазона

Протокол АССНЛ используется всеми объектами, нуждающимися в (надежной) передаче данных по абонентским каналам L-диапазона между КА и АТ. Протокол АССНЛ позволяет использовать пакеты абонентских каналов совместно с другими протоколами. Логический канал протокола АССНЛ является двусторонним и использует части абонентского канала трафика в линии «вверх» и «вниз», управляющее слово и поле полезной нагрузки при передаче между КА и АТ. Протокол АССНЛ обеспечивает транспортировку сообщений различного размера по логическому каналу АССНЛ и используется для гарантии доставки сообщений КА (АТ). Он использует протокол LBP только в той его части, в которой протокол LBP осуществляет арбитраж доступа к физическому уровню ССС в случае возникновения конфликта в отношении радиоресурсов физического уровня.

2.4.5. Протокол физического уровня L-диапазона

Протокол LBP представляет собой интерфейс управления между КА и АТ. Основная характерная особенность протокола LBP заключается в том, что, в отличие от АССНЛ, им не гарантируется доставка сообщений. Примерами передаваемых таким образом сообщений являются сигналы вызова, направленные сообщения, сообщения по каналу радиовещания, кандидаты АТ на переключение, списки кандидатов АТ для переключения, поправки, связанные с доплеровским сдвигом/синхронизацией/регулированием мощности.

2.5. Обработка вызовов в ССС Iridium

Обработка вызовов в ССС Iridium заключается в обеспечении обнаружения сигнала, доступа, регистрации и автоматической регистрации, телефонии и переключения.

2.5.1 Обнаружение сигнала

Обнаружение сигнала является первым этапом в получении обслуживания от ССС Iridium и состоит в установлении линии связи между КА и АТ. Обнаружение сигнала необходимо АТ для регистрации в сети, установления со-

единения, ответа на завершение вызова или для начала любого обслуживания в ССС.

Первоначально АТ должен обнаружить сигнал КА. Первыми этапами обнаружения сигнала КА являются обеспечение цикловой синхронизации, определение надлежащего временного слота по линии «вниз» и обнаружение доплеровского сдвига частоты в принятом сигнале. Затем АТ должен скорректировать передаваемый сигнал с тем, чтобы сигнал, принимаемый на КА, поступил в надлежащем временном слоте приема и имел минимальный доплеровский сдвиг.

Для обнаружения сигнала АТ настраивает свой приемник и выделяет спутниковый радиовещательный канал в луче, в котором он располагается. В канале вызова предаётся время/частота радиовещания для каждого луча, и АТ на основании этих параметров может определить канал, который он должен использовать. На основе декодированной передачи с КА (радиовещательные сообщения с информацией относительно обнаружения сигнала) АТ определяет наличие разрешения на обнаружение сигнала. Это осуществляется посредством контроля класса обнаружения сигнала. Команда на отказ в обнаружении сигнала с КА может быть обусловлена текущей высокой загрузкой данного КА или ССС в целом, а также некоторыми другими ограничениями системы. Если КА выдает разрешение на обнаружение сигнала, АТ выделяет идентификатор (ID) луча и выбирает произвольный канал обнаружения сигнала.

Каждый АТ оценивает доплеровский сдвиг и рассчитывает время связи по линии «вверх» на основе ID луча. При повторном запросе АТ корректирует время своего излучения и частоту, а затем передает на КА по каналу обнаружения сигнала ориентировочный пакет (сообщение с запросом на обнаружение сигнала). После получения от АТ сообщения с запросом на обнаружение сигнала КА рассчитывает временную и частотную погрешность принятого сигнала. После этого КА направляет на АТ сообщение о присвоенном ему канале (комбинации несущей частоты и временного слота в кадре), а также о поправке ко времени и частоте.

Каждый АТ способен компенсировать максимальный доплеровский сдвиг несущей частоты по линии «вверх» до $\pm 37,5$ кГц для удовлетворения установленных требований в отношении частоты передачи. В ходе натурных испытаний наблюдалась устойчивая связи КА с мобильными АТ, движущимися на скоростях до 1,5 км/с (5400 км/ч).

После каждой передачи по каналу обнаружения сигнала по линии «вверх» АТ принимает и анализирует данные в канале радиовещания с целью поиска подтверждения на свой запрос (сообщение от КА о присвоении канала), а также убеждается в сохранении класса обнаружения сигнала в ССС. Если на запрос АТ не получено подтверждения, он повторяет свой запрос через произвольный интервал времени (время определяется в соответствии с протоколом Aloha) на произвольном канале обнаружения сигнала. Это позволяет свести к минимуму число коллизий между обнаруживающим сигнал АТ и другими АТ, пытающимися использовать данный канал обнаружения сигнала.

После получения сообщения о присвоении канала АТ немедленно переходит на новый канал синхронизации и подтверждает изменение путем направления на КА сообщения о проверке синхронизации. КА измеряет смещение по времени и частоте принятого сообщения и направляет в ответ сообщение о синхронизации. Сообщение о синхронизации содержит данные о статусе синхронизации. КА устанавливает статус синхронизации «Sync OK», если погрешности времени и частоты находятся в допустимых пределах для начала использования абонентского канала. Если КА направляет сообщение о требуемом повторе синхронизации, то АТ корректирует время и частоту и вновь направляет сообщение о проверке синхронизации. Если КА направляет «Sync OK» в сообщении о синхронизации, то АТ передает подтверждение в сообщении о проверке синхронизации и ожидает получения от КА сообщения о переключении с режима установления синхронизации на режим передачи пользовательского трафика. После получения сообщения на переключение с режима синхронизации на режим передачи трафика АТ выходит из процесса обнаружения сигнала и приступает к процессу доступа к КА. После этого КА переключается с канала синхронизации на абонентский канал.

2.5.2. Управление обнаружением сигнала и воспреещение доступа

В определенных обстоятельствах может возникнуть необходимость воспрепятствовать АТ делать попытки обнаружения сигнала. Такими обстоятельствами могут быть аварийная ситуация, перегрузка луча, КА или ССС. В таких случаях по каналу радиовещания указывается, какие АТ могут предпринять попытку обнаружения сигнала.

Все АТ разделены на десять приоритетных классов (0-9), которые называются классами обнаружения сигнала. Большему приоритету соответствует больший номер класса. Оборудование АТ считывает класс обнаружения сигнала с SIM-карты, которая программируется на определенный приоритет при выдаче. Кроме того, АТ могут быть членами одной или нескольких специальных категорий (классы обнаружения сигнала 11-15), которые также хранятся в АТ. Система обеспечивает возможность управления обнаружением сигнала системы на основе следующих классов обнаружения сигнала:

- 0–9 – обычные АТ (произвольно распределенные между собой);
- 10 – экстренные вызовы;
- 11 – противопожарная служба, полиция, аварийно-спасательные организации;
- 12 – зарезервирован;
- 13 – зарезервирован;
- 14 – служба обеспечения безопасности аэронавигации;
- 15 – используется для внутренних служб ССС Iridium.

Использование приоритетных классов (классов обнаружения сигнала) позволяет не допустить перегрузки каналов обнаружения сигнала или абонентских каналов. Любое число этих классов может быть запрещено для обнаружения сигнала в любой момент времени.

При крайней нехватке системных ресурсов осуществляемые низкоприоритетные вызовы прерываются системой для обеспечения доступа для вызовов с АТ более высокого приоритета.

Если АТ является членом по крайней мере одного приоритетного класса, который соответствует разрешенному классу, то этот АТ приступает к обнаружению сигнала.

2.5.3. Организация доступа

В процессе доступа определяется местоположение АТ относительно районов диспетчерского обслуживания (SCA), определяемых в координатах Земли. На основе SCA, в пределах которого расположен АТ, и идентификатора поставщика обслуживания АТ (поставщик услуг спутниковой связи) принимается решение относительно того, может ли быть разрешено обслуживание этого АТ, и какая шлюзовая станция должна предоставлять это обслуживание. Данный процесс начинается сразу же после процесса обнаружения сигнала.

2.5.4. Регистрация в сети

Регистрация является процессом, посредством которого АТ сообщает ССС свое местоположение. Процесс регистрации позволяет ССС сохранять данные о местоположении обслуживаемых АТ в роуминге в качестве элемента управления их мобильностью.

Каждый АТ должен быть зарегистрирован в шлюзовой станции, обслуживающей его местоположение, для инициирования или завершения вызова. Регистрация АТ осуществляется по одной из следующих пяти причин:

1. В настоящее время АТ имеет недействительный временный идентификационный код абонента TMSI или код района.
2. Срок действия временного идентификационного кода абонента TMSI, присвоенного АТ, истекает.
3. Завершение или начало вызова выполнено и, основываясь на новом местоположении, система отправляет запрос к АТ с требованием перерегистрироваться.
4. Абонент ССС начинает процедуру ручной регистрации АТ.
5. Текущее местоположение АТ находится на удалении от точки последней регистрации, превышающем расстояние перерегистрации.

Процедура регистрации АТ (обновление местоположения) в ССС Iridium совпадает с соответствующей процедурой стандарта GSM и производится после процессов обнаружения сигнала и доступа.

По умолчанию в ССС используется режим автоматической регистрации – АТ осуществляет перерегистрацию в сети только по мере необходимости. Каждый АТ также автоматически перерегистрируется в ССС в том случае, когда ему известно, что его текущее местоположение находится на удалении от точки последней регистрации, превышающем установленное расстояние. С тем чтобы принять такое решение, АТ в пассивном режиме оценивает свое местоположение и позиционную погрешность на основе сообщений, собранных по каналу вызова перемещающихся КА.

2.6. Процедура «хэндовера»

Хэндовер в сотовой связи – это процесс передачи обслуживания абонента во время вызова или сессии передачи данных от одной базовой станции к другой. В данном случае, это процесс переключения АТ между КА и его различными лучами.

Спутники имеют остронаправленные антенны, обеспечивающие доступ к ним АТ. Эти антенны имеют конфигурацию, обеспечивающую проецирование множества лучей на поверхность Земли. Эти лучи быстро перемещаются относительно АТ и других КА. «Хэндовер» АТ, т. е. процесс автоматического переключения осуществляемого соединения от одного луча к другому (или иногда в пределах луча), необходим в трех ситуациях.

- 1) АТ должен переключиться с одного КА на другой вследствие их перемещения относительно АТ (межспутниковое переключение);
- 2) АТ должен переключиться с одного луча на другой по мере перемещения диаграмм направленности лучей относительно АТ (внутриспутниковое переключение).
- 3) АТ должен переключиться на другой канал (комбинацию несущей частоты и временного слота) в пределах того же луча для оптимизации использования частот и уменьшения помех (внутрилучевое переключение).

Несмотря на то, что переключение может быть инициировано КА, оно, как правило, осуществляется АТ.

По мере ухода КА (например, за горизонт) и приближения нового КА (например, появление его в поле видимости АТ над горизонтом) АТ должен переключиться с текущего КА на новый КА. Во время телефонного соединения такое межспутниковое переключение происходит в среднем приблизительно каждые 5 мин. Оно может инициироваться чаще, вплоть до 5 сек или реже, вплоть до 10 мин, в зависимости от геометрии линии связи.

По мере движения КА от экватора к полюсу фактическое расстояние между соседними КА уменьшается до нескольких километров, а затем увеличивается до нескольких тысяч километров, когда КА вновь приближаются к экватору. Для исключения радиопомех лучи вблизи границ зоны действия КА выключаются, когда КА приближается к полюсу, и затем вновь включаются при его приближении к экватору. Кроме того, одни и те же радиоканалы никогда не располагаются в смежных лучах КА или между соседними КА. Таким образом, по мере прохождения КА и его лучей над АТ он должен довольно часто переключаться на новый луч. Такое внутриспутниковое переключение осуществляется приблизительно каждые 50 с в ходе установленного соединения АТ и КА.

По мере изменения геометрии расположения КА их радиоканалы должны перераспределяться между лучами для исключения взаимных помех. Этот процесс может потребовать переключения АТ на другой канал в том же луче. Этот процесс называется внутрилучевым переключением. Кроме того, АТ может запросить внутрилучевое переключение для уменьшения помех. Если ССС обна-

руживает изменение распределения радиоресурсов, в результате которого она не будет располагать достаточным количеством каналов для поддержки ряда текущих АТ, то КА предложит АТ переключиться на другие лучи, и, таким образом, соединения не будут прерываться в процессе изменения радиоресурсов CCC. Переключения АТ в таких условиях называются добровольными. Добровольные переключения могут быть межспутниковыми или внутриспутниковыми, однако они инициируются АТ (по запросу к CCC), а не самой системой CCC Iridium.

3. Качество обслуживания в CCC Iridium

3.1 Основные связные услуги передачи трафика

Услуги RUDICS и SBD в CCC Iridium являются наиболее востребованными для организации связи в различных прикладных областях.

Услуга RUDICS предлагает наименьшее время установления соединения по сравнению со всеми стандартными услугами передачи данных по коммутируемым каналам. RUDICS основывается на режиме коммутации каналов.

Несмотря на то, что услуга SBD также основывается на использовании коммутируемых каналов, в рамках ее предлагается услуга передачи данных, которая обладает рядом характеристик, во многом сходных с вызовами в пакетном режиме.

3.2. Время установления соединения

Время установления соединения для вызова RUDICS составляет 10-14 с. После установления соединения в логическом канале обеспечивается надежная передача со скоростью как минимум 2,4 кбит/с, иногда – со скоростью приблизительно 2,6 кбит/с.

Поскольку услуга SBD использует только этап доступа при обычном установлении соединения, она не предусматривает передачи по всему тракту CCC – от шлюза до АТ и, таким образом, имеет более короткую задержку установления соединения. Соединение SBD может обеспечить передачу данных сразу же после завершения процесса обнаружения сигнала, который в среднем длится приблизительно 1,5 с. Следовательно, среднее время установления соединения составляет приблизительно 1,5 с для исходящих SBD и 3,6 с для входящих SBD, исходя из того, что в типичных эксплуатационных условиях продолжительность сигнала «звонок» составляет 2,1 с. Поскольку услуга SBD использует полезную нагрузку канала сигнализации (с защитой FEC), а не полезную нагрузку обычного канала трафика, средняя скорость составляет приблизительно 1,2 кбит/с, которая меньше, чем скорость стандартных услуг передачи данных CCC Iridium, таких как RUDICS.

Исходя из накопленных статистических данных о характеристиках CCC Iridium, задержка установления соединения при основанном на RUDICS вызове пакетных данных, как предполагается, должна составлять менее 30 с, а задержка установления соединения при основанном на SBD вызове пакетных данных – менее 9 с.

3.3. Своевременность передачи

При длине сервисного блока данных уровня подсети (SNSDU) равной 128 октетам, CCC Iridium обеспечивает следующие значения своевременности передачи данных.

При передаче пакетных данных на основе RUDICS ожидаемая задержка передачи данных (средняя задержка прохождения CCC «из конца в конец») 128-байтовой полезной нагрузки составит приблизительно $128 \times 8 / 2400 = 0,43$ с.

При передаче пакетных данных на основе SBD ожидаемая задержка прохождения данных 128-байтового сообщения составит приблизительно $128 \times 8 / 1200 = 0,86$ с. Следовательно, задержка прохождения данных пакета АТ высшего приоритета должна составлять менее 5 с. Учитывая это и среднюю задержку передачи данных в CCC, задержка передачи данных в CCC (95-й процентиль) должна составлять менее 15 с при передаче данных АТ высшего приоритета.

3.4. Надежность связи

Надежность передачи определяется коэффициентом остаточных ошибок, который представляет собой свертку вероятностей необнаруженной ошибки, необнаруженной потери блока данных и необнаруженного дублирования блока данных.

Транспортный уровень CCC Iridium при передаче данных по коммутируемым каналам и по протоколу SBD использует ретрансляцию порядкового номера каждого блока данных и автоматического запроса повтора (ARQ) неверное принятых блоков данных. Эти механизмы гарантируют возможность соблюдения требуемых вероятностей необнаруженной потери и необнаруженного дублирования блоков данных.

Вероятность необнаруженной ошибки представляет собой коэффициент пакетных ошибок.

RUDICS использует 24-битовую последовательность проверки кадра, при этом поле полезной нагрузки пользователя в CCC Iridium составляет 248 бит. Для передачи 128-байтового пакета данных потребуется пять PDU Иридиум. Анализ данных свидетельствует о том, что вероятность передачи 128-байтового пакета данных с ошибками составляет $3 \cdot 10^{-7}$. Коэффициент пакетных ошибок можно дополнительно уменьшить, если использовать дополнительное предварительное помехоустойчивое кодирование передаваемых данных программным обеспечением пользователя. Однако предполагается, что коэффициент пакетных ошибок $3 \cdot 10^{-7}$ может быть обеспечен и без этого.

Услуга SBD использует канал сигнализации Iridium для передачи данных и является услугой гарантированной доставки с множеством уровней защиты от ошибок. Эта услуга использует прямое обнаружение и исправление ошибок в форме кодирования БЧХ в дополнение к селективному ARQ. По проекту, передача данных SBD имеет лучшие характеристики с точки зрения коэффициента пакетных ошибок, чем передача данных по коммутируемым каналам.

3.5. Качество обслуживания речевых вызовов

Основываясь на статистических данных по эксплуатации АТ в ССС Iridium, можно ввести следующие предположения о качестве обслуживания речевых вызовов.

Время установления исходящих и входящих речевых вызовов занимает соответственно 12 и 14 с.

Предполагается, что 95-й процентиль времени задержки инициирования вызова в интерфейсе взаимодействия наземных сетей после поступления события об инициировании вызова в интерфейс АТ не превысит 20 с.

Каждый АТ Iridium включает в себя усовершенствованный многополосный вокодер со скоростью 2,4 кбит/с, разработанный компанией Digital Voice System Inc. Этот вокодер специально разработан для канала связи ССС Iridium и обеспечивает акустические характеристики хорошего качества с номинальной среднебальной шкалой (MOS) 3,5 в стандартных условиях эксплуатации АТ и канала.

Анализ задержек в речевых вызовах в ССС Iridium свидетельствует о том, что полное значение данной характеристики составляет приблизительно 374 мс.

Для речевой связи предполагается, что полная задержка передачи речевого вызова в рамках подсети ССС Iridium не превысит 0,375 с.

Инициированный АТ речевой вызов, успешно полученный системой, получит отказ в обслуживании с вероятностью не более 10^{-2} .

3.6. Оповещение о возможных перерывах в предоставлении услуг связи

В ССС Iridium предоставляются регулярные прогнозы времени, места и продолжительности любых результирующих перерывов обслуживания, пока обслуживание не будет полностью восстановлено. Система извещает о потере возможности связи не позднее, чем через 30 с с того момента, когда она обнаруживает возможность потери связи.

3.7. Безопасность и защита

В ССС Iridium применяются различные методы защиты от попыток нарушить ее работу и исказить передаваемые сообщения.

Для успешного радиомониторинга каналов L-диапазона станция мониторинга должна располагаться в пределах зоны передачи контролируемого АТ, приблизительно в 10-30 км от передающего АТ при наземном базировании и приблизительно в 250-350 км от АТ при воздушном базировании. Зона приема передач АТ по линии «вниз» L-диапазона может быть намного шире т.к. один луч КА охватывает зону диаметром приблизительно 400 км.

При радиомониторинге фидерных линий необходимо размещение станции мониторинга в непосредственной близости от шлюзовой станции ССС Iridium. При этом, основными техническими сложностями при организации радиомониторинга являются:

- большие постоянно изменяющиеся доплеровские сдвиги;
- высокая пропускная способность каналов (приблизительно 3 Мбит/с);

- для мониторинга требуется антенна с высоким коэффициентом усиления;
- необходимость переключения на новый КА каждые 10 мин.

Защита от несанкционированного доступа (НСД) в ССС обеспечивается в процессе доступа АТ. В ходе этого процесса шлюзовая станция определяет правильность информации запрашивающего АТ о своем географическом местоположении. В случае правильной информации система запрашивает проверку информации о географическом местоположении, представленной запрашивающим АТ, с ID луча, используемого АТ. Если местоположение в зоне луча, ассоциированное с его ID, не совпадает с местоположением, указанным АТ, система устанавливает признак НСД. Затем система направляет АТ сообщение «Уведомление о решении в отношении доступа» с указателем, установленным на «отказ в доступе», и обслуживание данного АТ прекращается, за исключением аварийных вызовов.

Процесс аутентификации АТ в ССС Iridium осуществляется в соответствии с техническими требованиями GSM. При этом ССС Iridium обеспечивает защиту от внешних попыток нарушить обслуживание с помощью мер и средств в ее шлюзовых станциях, а также в процессе аутентификации АТ, и благодаря встроенным в радиоинтерфейс ССС средствам защиты.

Заключение

В статье представлена описательная модель негеостационарной ССС Iridium. Данная модель может использоваться для моделирования связанных процессов в отечественной негеостационарной ССС «Эфир» («Сфера»), прототипом которой может служить ССС Iridium. Кроме того, данная модель может быть использована при проектировании АТ, функционирующих совместно с ССС Iridium в перспективных проектах обеспечения услугами связи судов на Северном морском пути, воздушных судов коммерческой авиации, а также глобальных информационно-телеметрических систем мониторинга.

Литература

1. Буйдинов Е. В., Кузовкова Т. А., Шаравова О. А. Методика и результаты оценки внешней эффективности развития инфраструктуры спутниковой связи на основе метода экстерналий // Электросвязь. 2018. № 4. С. 29-33.
2. Кузовкова Т. А., Кузовков Д. В., Шаравова О. И. Методические особенности комплексной оценки эффективности инфраструктурных проектов развития спутниковой связи // Век качества. 2017. № 1. С. 97-109.
3. Аджемов А. С., Буйдинов Е. В., Кузовкова Т. А. Применение интегральной модели для оценки эффективности построения системы спутниковой связи // Электросвязь. 2016. № 4. С. 25-29.
4. Штаев Д. В., Рынгачев Ю. С., Павликов С. Н. Формирование технологий информационного обеспечения северного морского пути // Вестник Морского государственного университета им. адмирала Г.И. Невельского.

Серия: Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. 2016. № 75. С. 144-149.

5. Маринич А. Н., Припотнюк А. В., Устинов Ю. М. Мониторинг судов на трассах северного морского пути с помощью спутниковых систем связи // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2016. № 6 (40). С. 184-205.

6. Андронов А. С., Акзигитов Р. А., Стаценко Н. И., Акзигитова И. А. Мониторинг воздушных судов в труднодоступных районах посредством низкоорбитальной спутниковой связи Иридиум в комплексе передачи данных GSM на основе абонентского телеметрического терминала ASC-6 // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. Т. 1. № 12. С. 840-842.

7. Алябьев С. П., Чистов Э. Г. О возможности использования коммерческих спутниковых систем связи для передачи телеметрии разгонных блоков и космических аппаратов (технология "Флайт-модем") // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2012. № 3 (14). С. 48-52.

8. Ерёмин Д. И., Торчик В. В. Терминал сбора и передачи данных на базе мобильной космической связи Iridium // Технические науки - от теории к практике. 2014. № 35. С. 55-62.

9. Иванов В. И. Алгоритм централизованной многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в негеостационарной спутниковой системе связи с межспутниковыми линиями // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 3. С. 69-105. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-03/05-Ivanov.pdf> (дата обращения 03.09.2018).

10. Doc 9925 AN/475. Руководство по авиационной подвижной спутниковой (маршрутной) службе. – М.: ИКАО, 2011. – 190 с.

11. Pelton J. N., Madry S., Camacho-Lara S. Handbook of Satellite Applications. – Cham: Springer, 2017. – 1556 с.

12. Cochetti R. Mobile satellite communications handbook. – Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2015. – 249 с.

13. Chini P., Giambene G., Kota S. A survey on mobile satellite systems // International journal of satellite communications. 2010. vol. 28. P. 29-57.

14. Gupta O. P. Global Augmentation of ADS-B Using Iridium NEXT Hosted Payloads [Электронный ресурс], 2011. – URL: https://mafiadoc.com/global-augmentation-of-ads-b-using-iridium-next-ieee-xplore_598259a61723ddeb563a117b.html (дата обращения 03.09.2018).

15. Крылов А. Спутниковые системы связи и вещания. Состояние и перспективы развития. – М., 2014. – 182 с.

16. РКС провел презентацию новой системы глобальной спутниковой связи // Российские космические системы [Электронный ресурс]. 22.04.2018. – URL: <http://russianspacesystems.ru/2018/05/22/rks-provel-prezentaciyu-novoy-sistemy-efir/> (дата обращения 06.09.2018).

17. Персональная подвижная спутниковая связь. Конспект лекций. – Красноярск, 2016. – 60 с.

18. Челышев В. Д., Якимовец В. В. Зарубежный спутниковый мобильный радиосервис уровня 3G, 4G в приполярных районах Арктики // Техника радиосвязи. 2016. № 3 (30). С. 23-32.

19. Челышев В. Д., Алисевич Е. А. Направления развития информационно-телекоммуникационных комплексов в арктических районах // Проблемы экономики и управления в торговле и промышленности. 2016. № 1 (13). С. 81-86.

References

1. Buydinov E. V., Kuzovkova T. A., Kuzovkov D. V. The rationale for the selection of effective satellite communications project based on expert qualimetry method. *Electrosvyaz*, 2018, no. 4, pp. 25-33 (in Russian).

2. Kuzovkova T. A., Kuzovkov D. V., Sharavova O. I. Methodological features of complex evaluation of efficiency of infrastructure projects of satellite communication. *Age of Quality*, 2017, no. 1, pp. 97-109 (in Russian).

3. Adjemov A. S., Buydinov E. V., Kuzovkova T. A. The application of the integrated model to assess the effectiveness of constructing a system of satellite communication. *Electrosvyaz*, 2016, no. 4, pp. 25-29 (in Russian).

4. Shtaev D. V., Ryngachev Iu. S., Pavlikov S. N. Formirovanie tekhnologii informatsionnogo obespecheniia severnogo morskogo puti [Formation of information support technologies of the Northern sea route]. *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta im. admirala G.I. Nevel'skogo. Seriya: Avtomaticheskoe upravlenie, matematicheskoe modelirovanie i informatsionnye tekhnologii*, 2016, no. 75, pp. 144-149 (in Russian).

5. Marinich A. N., Pripotnyuk A. V., Ustinov Yu. M. Monitoring of ships along the northern sea route using satellite communication systems. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, 2016, vol.40, no. 6, pp. 184-205 (in Russian).

6. Andronov A. S., Akzigotov R. A., Statsenko N. I., Akzigitova I. A. Monitoring of aircraft in remote areas via the iridium low-orbit satellite communications in the complex GSM data based on the user terminal telemetry ASC-6. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики*, 2016, vol. 1, no. 12, pp. 840-842 (in Russian).

7. Alyabiev S. P., Chistov E. G. On availability of commercial communication satellite systems for transfer of sc and upper stages telemetry data ("flight-modem" technology). *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2012, vol. 14, no. 3, pp. 48-52 (in Russian).

8. Eryomin D. I. Torchik V. V. Data collection and transmission terminal based on iridium mobile satellite communication. *Tekhnicheskie nauki - ot teorii k praktike*, 2014, no. 35, pp. 55-62 (in Russian).

9. Ivanov V. I. Algorithm of centralized multipath routing with load balancing for nongeostationary telecommunication satellite system with intersatellite links. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 3, pp. 69-105. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-03/05-Ivanov.pdf> (accessed 3 September 2018) (in Russian).

10. Doc 9925 AN/475. Manual on the Aeronautical Mobile Satellite (Route) Service. International Civil Aviation Organization, 2010. 180 p.
11. Pelton J. N., Madry S., Camacho-Lara S. Handbook of Satellite Applications. Cham, Springer, 2017. 1556 p.
12. Cochetti R. Mobile satellite communications handbook. Hoboken, John Wiley & Sons Inc, 2015. 249 p.
13. Chini P., Giambene G., Kota S. A survey on mobile satellite systems. *International journal of satellite communications*, 2010, vol. 28, pp. 29-57.
14. Gupta O. P. Global Augmentation of ADS-B Using Iridium NEXT Hosted Payloads. 2011. Available at: https://mafiadoc.com/global-augmentation-of-ads-b-using-iridium-next-ieee-xplore_598259a61723ddeb563a117b.html (accessed 03.09.2018).
15. Krylov A. Sputnikovye sistemy svyazi i veshchaniia. Sostoianie i perspektivy razvitiia [Satellite communication and broadcasting systems. Status and prospects of development]. Moscow, 2014. 182 p. (in Russian).
16. RKS provel prezentatsiiu novoi sistemy global'noi sputnikovoi svyazi // Rossiiskie kosmicheskie sistemy [RCC held a presentation of the new global satellite communication system]. 22.04.2018. Available at: <http://russianspacesystems.ru/2018/05/22/rks-provel-prezentatsiyu-novoy-sistemy-efir/> (accessed 06.09.2018) (in Russian).
17. *Personalnaia podvizhnaia sputnikovaia svyaz* [Personal mobile satellite communication]. Krasnoyarsk, 2016. 60 p (in Russian).
18. Chelishev V. D., Yakimovets V. V. 3G, 4G layer foreign mobile satellite radioservice in circumpolar arctic region. *Radio communication technology*. 2016. vol. 30, no. 3, pp. 23-32 (in Russian).
19. Chelishev V. D., Alisrvich E. A. Directions of development of information and telecommunication complexes in the Arctic regions. *Problemy ehkonomiki i upravleniya v torgovle i promyshlennosti*, 2016, vol. 13, no. 1, pp. 81-86 (in Russian).

Статья поступила 10 сентября 2018 г.

Информация об авторе

Макаренко Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент. Заместитель генерального директора по научной работе. ООО «Корпорация «Интел Групп». Область научных интересов: сети и системы связи; радиоэлектронная борьба; информационное противоборство. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Адрес: Россия, 197372, Санкт-Петербург, Богатырский пр., д. 32, корп. 1, лит. А, офис 6Н.

Descriptive Model of Iridium Satellite Communication System

S. I. Makarenko

Relevance. *New promising projects such as the Northern sea route, the development of Arctic minerals, the information and telemetric systems for monitoring air and land transport in high latitudes require communication service. Non-geostationary satellite communication systems (SCS) provide uninterrupted and stable communication at high latitudes for all users. Currently the non-geostationary SCS "Ether" ("Sphere") project is being created in Russia. Simultaneously the technical decision making of SCS requires the source data for modeling various ways of building the communication. Non-geostationary SCS Iridium, which is a prototype of SCS "Ether" ("Sphere"), can be used for form that kind of the source data. **The aim of the paper** is to form a descriptive model of SCS Iridium. The descriptive model will be used for development of the source data for create of the SCS "Ether" ("Sphere"). Only open sources were used to develop the descriptive model of the SCS Iridium. **Results and their novelty.** The element of practical novelty of the paper is the revealed general technological features of a non-geostationary SCS by the example of SCS Iridium. In particular, general principles of formation of orbital grouping satellites, organization channel in "up" and "down" lines, using of signal-code structures in channels, protocols at different levels of OSI model are described. In addition, statistical data about quality of service in the SCS Iridium are presented in the paper. **Practical significance.** Technical specialists to justify new technological solutions for the SCS «Ether» («Sphere») will use the descriptive model, which is presented in the paper. In addition, the model will be helpful for scientists who conduct research in the field of satellite communications.*

Keywords: *model, descriptive model, satellite communication system, mobile satellite communication system, Iridium.*

Information about Author

Sergey Ivanovich Makarenko – Ph.D. of Engineering Sciences, Docent. Chief designer. "Intel Group Corporation" Ltd. Field of research: stability of network against the purposeful destabilizing factors; electronic warfare; information struggle. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Address: Russia, 197372, Saint Petersburg, Bogatyrskiy prospect, 32, korp. 1A, office 6N.