

2. Спутниковая система персональной связи *Iridium*

Назначение ССПС Iridium

Спутниковая система персональной связи *Iridium* предназначена для обеспечения абонентов, находящихся в любых районах мира, доступной и надежной двусторонней связью. Эта система обеспечивает 100%-е покрытие земного шара. Орбиты 77 низкоорбитальных

спутников полярные. Особенностью системы является применение межспутниковой связи в диапазоне 23 ГГц для организации глобального охвата. При этом спутниковая СППС *Iridium* предоставляет абонентам следующие виды услуг:

- речевую связь;
- передачу данных;
- передачу факсимильных сообщений;
- персональный вызов;
- определение местоположения объекта.

В состав бортового специального оборудования КА типа *Iridium* входит аппаратура связи, работающая в диапазоне частот 1,6/2,5 ГГц (для подвижных абонентов), 29/19 ГГц (для узловых станций) и 23 ГГц (для организации межспутниковой связи).

Передача речи. Речевые сообщения передаются дискретными блоками. Каждый блок защищен от ошибок с помощью помехоустойчивого кода с прямым исправлением ошибок. Скорость передачи речи составляет 2,4 кбит/с. Средняя оценка качества составляет 3,2 (оценка MOS). Продолжительность переговоров 30 с (без прерывания связи) обеспечивается с вероятностью 98 %. Время установления связи аналогично времени установления связи между абонентами наземной сотовой связи и не превышает 2 с. Максимальная задержка сигнала при международной связи не превышает 410 мс для 90 % вызовов, для местной и зоновой связи – в среднем 240 мс. В речевом кодере используется алгоритм с линейным предсказанием VSELP.

Передачи данных. Передача данных осуществляется со скоростью 2,4 кбит/с с вероятностью ошибки в канале связи не более 10^{-6} . Предусматривается также возможность передачи коротких сообщений, определяющих местоположение и статус абонента.

Факсимильные сообщения. Обмен факсимильными сообщениями осуществляется со скоростью 2,4 кбит/с с использованием факсимильных аппаратов 3-й группы. Факсимильное сообщение посылается вызывающей стороной на номер факса абонента системы и хранится в его «почтовом ящике». Далее на пейджер или телефон посылается сообщение о получении факсимильного сообщения, после чего оно может быть переадресовано на факсимильный аппарат или на компьютер, соединенный с абонентским терминалом.

Сигналы персонального вызова. Сигналы персонального вызова могут приниматься с помощью специальных приемников (пейджеров) или портативных радиотелефонных терминалов. Объем передаваемых сообщений составляет 200 и 20 знаков цифрового сообщения в тоновом режиме. При передаче пейджинговых сообщений абонент указывает до 10 зон, где он может находиться, и в эти зоны передаются сообщения. Используя телефон с тоновым набором, или позвонив на доступный номер «домашней» станции сопряжения, абонент может изменить область доставки сообщения. В канале персонального радиовызова предусмотрен энергетический запас, составляющий, по утверждению фирмы «Motorola», 35 дБ.

Определение координат. Определение координат пользователей предполагается осуществлять без специальной радионавигационной аппаратуры. Для этого измеряется разность между реальным и ожидаемым временем прихода сигнала (метод POCA – Point of closest approach). Учет этих параметров и эфемерид орбит позволяет произвести оценку расстояния и времени. Далее решается система дифференциальных уравнений и рассчитывается дальность. При однократном измерении точность определения местоположения не превышает 1,6 км, однако при более длительном измерении точность может быть улучшена. В тех случаях, когда необходима более высокая точность определения местоположения (порядка 100 м), необходимо использовать абонентскую станцию со встроенным GPS-приемником.

Кроме того, СППС *Iridium* имеет выход на сети сотовой связи GSM и IS-41 (AMPS/NAMPS, DMPS, CDMA, TDMA). Возможна конвертация протоколов разных сотовых

систем.

Надежность соединения находится на уровне 85 % от наземной сотовой системы связи. В системе *Iridium* предусматривается реализация функций защиты сообщений пользователей от несанкционированного доступа.

Компания-оператор глобальной мобильной спутниковой связи «Iridium Satellite LLC» объявила о начале технологических исследований по облику и архитектуре нового поколения орбитальной группировки КА *Iridium*. При этом в 2006 г. начат сбор и анализ данных по структуре и объему трафика с тем, чтобы выработать необходимые концепции развития. Нынешнее состояние орбитальной группировки КА позволяет поддерживать голосовую связь и низкоскоростную передачу данных в любой точке Земли, причем техническое состояние КА может обеспечить эти услуги до 2014 г. и далее. Замена устаревших КА на КА нового поколения, особенностью которых будет, в том числе и межспутниковая связь по лазерному лучу в оптическом диапазоне, позволит предложить пользователю новые услуги, такие как телевидение по IP-протоколу и радио по запросу.

Компания «Iridium Satellite LLC» активно развивает предоставляемые пользователям услуги для расширения рынков и дальнейшего динамичного развития. Так, в частности, в 2003 г. запущены такие виды сервиса, как:

- сервис *Iridium Short Burst Data*, обеспечивающий передачу сжатых файлов данных объемом до 1960 бит;
- SMS-сервис для коммерческого использования, позволяющий отправлять и получать сообщения длиной 160 символов в любой точке Земли, а также отправлять и получать e-mail. Если телефон получателя выключен, то SMS-сообщение сохраняется в течение восьми дней.

Состав спутниковой системы персональной подвижной связи *Iridium*

В состав системы *Iridium* входят космический, наземный и абонентский сегменты. Структура системы изображена на рисунке 2.1.

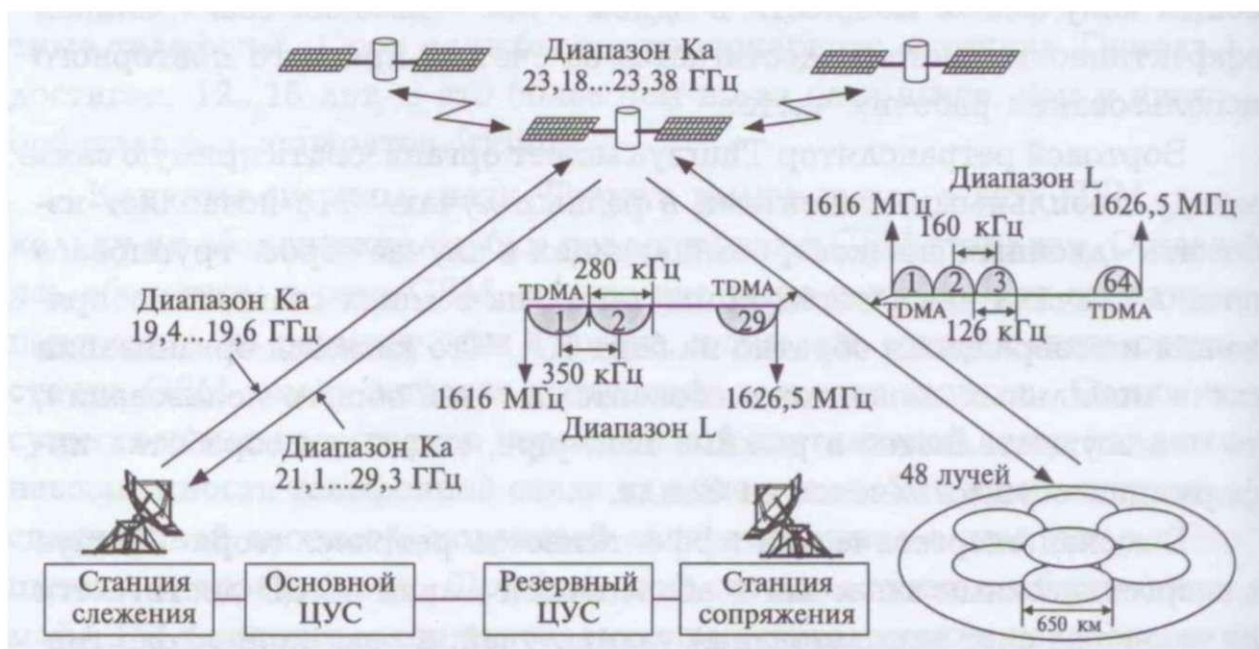


Рис. 2.1. Состав и структура системы *Iridium*

Космический сегмент.

Орбитальная группировка ССППС *Iridium* состоит из 66 основных и 14 резервных КА, выведенных на низкие квазиполярные орбиты высотой 780 км. КА распределены в шести

равноудаленных друг от друга орбитальных плоскостях по 11 КА в каждой плоскости. КА в одной плоскости равноудалены друг от друга, и угловой разнос между соседними КА составляет примерно $32,7^\circ$. Соседние орбитальные плоскости разнесены на $31,6^\circ$, а разнос между 1-й и 6-й плоскостями составляет $22,1^\circ$. Период обращения КА вокруг Земли равен 100 мин 28 с. Тип орбиты – квазиполярная круговая с наклоном $86,4^\circ$ (таблица 2.1).

Между КА организована межспутниковая связь. Каждый КА может связаться с четырьмя другими, а именно:

- с двумя КА, расположенными спереди и сзади в той же орбитальной плоскости;
- с двумя КА, расположенными слева и справа в соседних плоскостях.

Вывод КА на орбиту осуществляется ракетами-носителями Дельта-2 (по пять КА), Протон (по семь КА) и Лонг Марш 2С (по два КА).

Таблица 2.1

Группировка КА спутниковой СППС

Система	КА	Параметры орбиты	Число КА	
			Всего в системе	В зоне доступности РФ
<i>Iridium</i>	<i>Iridium</i>	$h = 780 \text{ км}$ $i = 86,4^\circ$	66 – основн.	66
			14 - резерв	14
	Всего в системе		80	80

В течение 2002 г. продолжались работы по совершенствованию орбитальной группировки глобальной многоспутниковой низкоорбитальной системы цифровой персональной связи *Iridium*. Так, в феврале 2002 г. с ЗРП США с помощью ракеты-носителя Дельта-2 осуществлен запуск КА *Iridium* -89, -90, -91, -92, -93 для замены неисправных КА. Кроме того, в июне 2002 г. со стартового комплекса космодрома Плесецк (Россия) с помощью ракеты-носителя Рокот осуществлен запуск двух КА типа *Iridium* – *Iridium* -94, -95 (02311, 02312).

В результате этого в настоящее время на орбите находятся 91 КА-ретранслятор типа *Iridium* (в том числе 66 основных, 14 резервных и 11 неисправных КА) в шести орбитальных плоскостях.

По оценке американских специалистов, орбитальная группировка системы связи *Iridium* может успешно функционировать до конца 2014 г.

Масса КА составляет 690 кг, расчетный срок функционирования – 8 лет. Внешний вид КА представлен на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2. Внешний вид КА-ретранслятора *Iridium*.

На КА установлены радиоэлектронное оборудование, система ориентации и стабилизации, двигательная установка и система энергоснабжения.

Радиоэлектронное оборудование включает в свой состав центральный процессор, источник эталонной частоты, независимые приемопередающие тракты для связи со станциями сопряжения, межспутниковой связи, персональной связи, приема и передачи командно-телеметрической информации.

На КА используется трехосная система стабилизации на основе микроскопической автономной навигационной системы (МАНС) со встроенными датчиками астроориентирования, которые предназначены для инфракрасного зондирования земной поверхности и визуального определения местоположения по Луне и Солнцу. Система МАНС выдает данные с периодом 0,25 мс с точностью $\pm 0,25^\circ$ по пространственному положению и ± 20 км по позиции.

Энергоснабжение КА осуществляется от источника на солнечных батареях мощностью 1430 Вт. В состав системы энергоснабжения входит также никель-водородная аккумуляторная батарея емкостью 48 А/ч, обеспечивающая поддержание питания при нахождении КА в теневой зоне.

Каждый КА формирует зону обслуживания диаметром 4,7 тыс. км и площадью около 19 млн. км².

На КА установлены три группы антенн:

- шесть фазированных антенных решеток (ФАР), формирующих 48 парциальных лучей на прием и передачу в L-диапазоне 1616-1626,5 МГц;
- четыре антенны для организации связи со станциями сопряжения в Ka-диапазоне 19,4 – 19,6 и 29,1 – 29,3 ГГц;
- четыре волноводно-щелевые антенны для межспутниковой связи в Ka-диапазоне 23,18 – 23,38 ГГц.

Диаграммы направленности АФАР задаются программным способом, что позволяет независимо изменять параметры каждого луча и избежать перекрытия зон от смежных КА, особенно при их движении к полюсу.

В фидерной и абонентской радиолиниях используется правая круговая поляризация, в межспутниковых линиях – вертикальная поляризации.

На КА использована 48-лучевая антенная система, состоящая из шести активных фазированных антенных решеток, каждая из которых формирует восемь 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.

На КА-ретрансляторах LEO *Iridium* многолепестковая антенна (МЛА) имеет малокольцевую конфигурацию с небольшим числом лучей – $n_k = 4$, $N_I = 48$. В таких МЛА используются лучи с достаточно широким лепестком диаграммы направленности $\Delta\gamma_k/2 = 15...17^\circ$ и усилением на один луч порядка $G_{л} = 30...50$. Однако небольшая высота орбиты (770 км) и относительно небольшая наклонная дальность (примерно 2200 км для КА-ретрансляторов *Iridium* при $(\beta > 10^\circ)$) позволяют достичь необходимой энергетики радиолинии.

На КА-ретрансляторе *Iridium* бортовые ФАР состоят из трех секторных плоских решеток с $M = 96$ антенными элементами в каждом секторе. С помощью этих ФАР формируется трехсекторная кольцевая МЛА с последовательным увеличением числа лучей в каждом кольце в виде натурального ряда нечетных чисел (1, 3, 5...), т.е. с числом лучей в поясе k , равным $(2k - 1)$, и общим числом лучей в k поясах $N_c = n_k^2$. В трех секторах кольцевой МЛА КА-ретрансляторов *Iridium* при $n_k = 4$ размещается $N_I = N_{3c} = 3n_k^2 = 48$ лучей. Формирование зоны обслуживания КА-ретранслятора *Iridium* показано на рисунке 2.3.

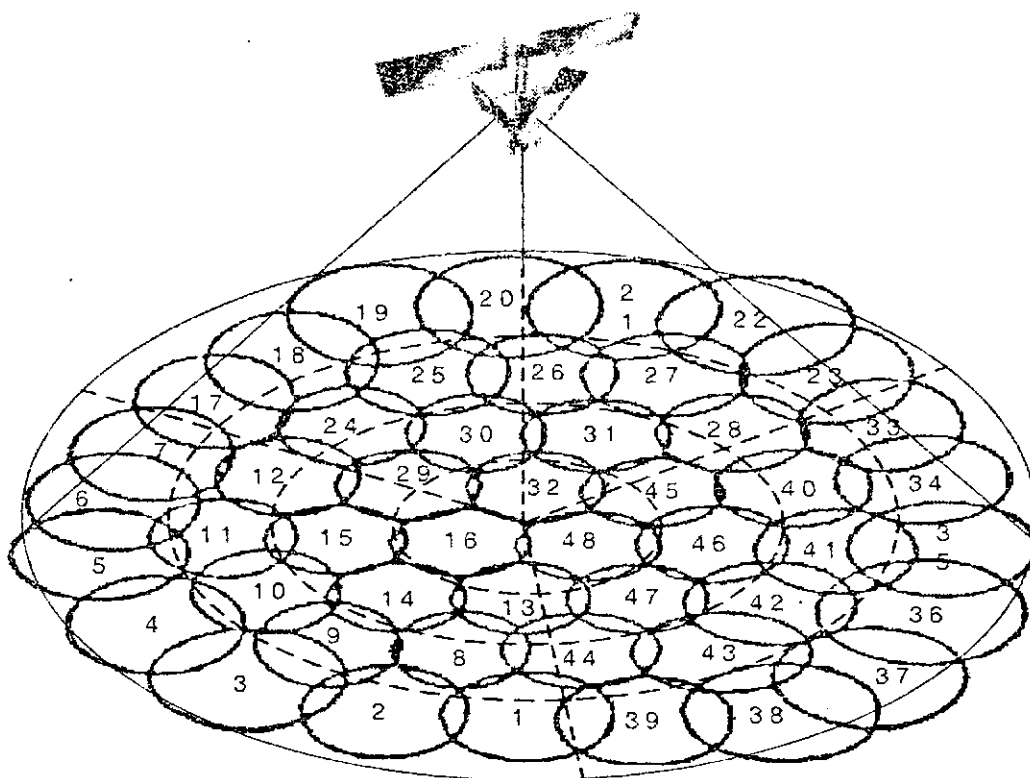


Рисунок 2.3. Формирование зоны обслуживания КА-ретранслятора *Iridium*.

Наземный сегмент

Наземный сегмент включает в свой состав станции сопряжения (СС) и центры управления системой и связью.

Сегмент управления группировкой КА включает в себя основной центр управления (ЦУ), расположенный под г. Вашингтоном (шт. Виржиния), и резервный ЦУ, расположенный в г. Фучино (Италия). Они осуществляют передачу команд и прием телеметрической информации, обеспечивают контроль функционирования каждого КА, а также контроль функционирования всей системы *Iridium* в целом. Кроме того, существуют четыре станции телеметрии, слежения и контроля, расположенные на Гавайях, в Канаде и Исландии.

База данных кодовых номеров абонентов каждой СС содержит также данные обо всех СС системы. При необходимости между различными СС может происходить обмен базами данных. Обобщенная база данных содержится в сегменте управления системой и связью. В настоящее время станции сопряжения располагаются в следующих регионах: Бангкок (Таиланд), Пекин (Китай). Пуна (Индия), Джидда (Саудовская Аравия), Дюссельдорф (Германия), Фучино (Италия). Мехико (Мексика), Москва (Россия), Нагано (Япония), Феникс (США), Рио-де-Жанейро (Бразилия), Сеул (Южная Корея), Тай-Бей (Тайвань), Гавайские острова (США).

Абонентское оборудование. Абонентское оборудование представлено портативными телефонами и пейджерами, внешний вид которых изображен на рисунке 2.4. Портативные телефоны при наличии соответствующих картриджей имеют возможность выхода в наземные сети сотовой связи стандартов GSM, AMPS, CDMA.



Рисунок 2.4. Внешний вид абонентских терминалов ССПС *Iridium*

Каждый пользовательский терминал регистрируется в национальной станции сопряжения, ему присваивается кодовый номер и оговаривается первоначальное размещение.

Виды радиолиний.

В спутниковой системе подвижной связи *Iridium* между КА, абонентами и станцией сопряжения (СС) задействуются следующие радиолинии:

- абонентские радиолнии «АТ – КА», «КА – АТ»;
- фидерные радиолнии «СС – КА», «КА – СС»;
- межспутниковые радиолнии «КА – КА»;
- командно-телеметрические радиолнии.

Основные характеристики радиолний приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Тип радиолнии	Абонентская		Фидерная		Межспутниковая
	«вверх»	«вниз»	«вверх»	«вниз»	
Диапазон частот, ГГц	1,616 – 1,6265		29,1 – 29,3	19,4 – 19,6	23,18 – 23,38
Скорость передачи, Мбит/с	0,18	0,4	12,5	12,5	25
ЭИИМ, дБВт	5,9 – 8,8	12,4 – 31,2	51,4 – 77,4	14,5 – 27,5	37,9
Модуляция	ФМн-4	ФМн-4	ФМн-4	ФМн-4	ФМн-4

Связь между абонентами системы осуществляется следующим образом. Сначала проверяется возможность работы через наземную сотовую сеть радиотелефонной связи, и лишь при невозможности этого АТ напрямую связывается с ближайшим КА, а далее – с нужным абонентом или станцией сопряжения.

Приняв вызов абонента, СС прежде всего определяет, принадлежит ли данный абонент системе *Iridium*. Затем определяется местоположение абонента с помощью базы данных. После этого задается направление маршрутизации вызовов и формируется маршрутный заголовок. Эти данные передаются на КА, где с их помощью выбирается положение коммутатора на КА.

Абонентские радиолнии. Для связи с абонентскими терминалами на борту КА установлено шесть активных фазированных антенных решеток (АФАР), каждая из которых формирует восемь лучей. Таким образом, КА формирует 48 лучей, каждый из которых образует парциальную зону (соту) диаметром около 600 км. В совокупности 48 лучей формируют подспутниковую зону диаметром порядка 4,7 тыс. км.

Для предотвращения перекрытия зон от смежных КА, особенно при их смещении к полюсам, предусматривается изменение диаграммы направленности АФАР программным способом. Вид поляризации – круговая правого вращения.

Связь абонента с КА осуществляется в диапазоне частот 1616 – 1626,5 МГц. Для организации доступа абонентов в систему используется сочетание нескольких видов многостанционного доступа (МД):

- МД с пространственным разделением (МДПР), организуемый за счет узких лучей, формируемых КА;
- МД с временным разделением каналов (МДВР), используемый в одном луче;
- МД с частотным разделением каналов (МДЧР), используемый для разделения смежных лучей.

Благодаря МДЧР каждая 8-лучевая структура обеспечивает возможность повторения полосы частот. В результате диапазон частот 1616 – 1626,5 МГц используется в системе более 150 раз.

Частотный диапазон радиолинии «АТ – КА» содержит 64 частотных канала, девять из которых используются для управления, с разносом 350 кГц и полосой частот каждого канала 126 кГц. Частотный диапазон радиолинии «КА – АТ» содержит 29 каналов, четыре из которых используются для управления, с разносом 350 кГц и полосой частот каждого канала 280 кГц.

Абонентская радиолиния работает в дуплексном режиме. Метод модуляции – ФМн-4. Для ослабления уровня гармонических составляющих модулированный сигнал фильтруется. Для повышения помехоустойчивости используется сверточное кодирование со скоростью $R = 3/4$ и кодовым ограничением $k = 7$. Скорость передачи речи составляет 2,4 кбит/с. Для преобразования речи используется алгоритм с векторным линейным предсказанием. Оценка разборчивости речи составляет 3,2.

Каждый абонент работает в пакетном режиме, используя метод передачи «один пакет на несущую». Кадр МДВР состоит из восьми временных окон. Длительность кадра равна 90 мс. Для устранения помех предусматривается защитный интервал длительностью 22,48 мс. Синхронизация для кадра МДВР на передачу выделяется из сигнала, принимаемого с борта КА. Кадры для линий «АТ – КА» и «КА – АТ» идентичны по структуре и отличаются по скорости передачи. В линии «АТ – КА» скорость передачи – 180 кбит/с, а в линии «КА – АТ» – 400 кбит/с.

В абонентских радиолиниях обеспечивается следующая вероятность ошибки на бит:

- при передаче речи – не хуже 10^{-2} ;
- при передаче цифровых данных – не хуже 10^{-6} .

В абонентском терминале компенсируется уход доплеровской частоты путем автоматической регулировки частоты в радиолинии. Изменение дальности компенсируется за счет смещения начала времени передачи так, чтобы сигнал приходил на КА в строго синхронизированные моменты времени.

В абонентском терминале используется спиральная антенна с диаграммой направленности $0 - 360^\circ$ по азимуту и $10 - 90^\circ$ по углу места.

Средняя пропускная способность составляет 80 каналов на один луч. Таким образом, пропускная способность одного КА составляет 3840 симплексных каналов.

Особенность работы ССПС *Iridium* состоит в переходе абонента из луча в луч и одного КА на другой. Максимальное время пребывания абонента в зоне радиовидимости одного КА составляет 8-10 мин. Таким образом, частота переходов из луча в луч порядка одного раза в минуту. Так как в соседних лучах используются разные частоты, переход абонента из луча в луч влечет за собой смену частоты наземного терминала.

Фидерные радиолинии. Каждый КА может обеспечивать независимую связь с двумя станциями сопряжения, для чего на борту установлены две АФАР снизу конструкции моноблока КА. Связь между СС и КА осуществляется в диапазоне частот:

- 29,1 – 29,3 ГГц – в радиолинии «СС -КА»;
- 19,4 – 19,6 ГГц – в радиолинии «КА -СС».

В радиолинии предусматривается передача по шести каналам. Разнос между каналами равен 15 МГц. Метод модуляции – ФМн-4. Для увеличения помехоустойчивости используется сверточное кодирование со скоростью $R = 1/2$ и кодовым ограничением $k = 7$. В радиолинии используется метод статистического уплотнения каналов (цифровая интерполяция речи) с коэффициентом сжатия 2,2. Информация о сжатии, а также сигналы цикловой и тактовой синхронизации передаются по каналам управления.

В канале связи обеспечивается вероятность ошибки на бит не хуже 10^{-6} . Пропускная способность радиолинии – 1300 дуплексных каналов.

Станции сопряжения организуют доступ пользователей к системе и обеспечивают сопряжение с наземными телефонными сетями общего пользования (ТФОП). Для реализации этого на станции сопряжения ведется база данных зарегистрированных абонентов, производится учет поступающих вызовов, определение возможности доступа пользователя в систему, учет времени разговора абонента и других показателей, необходимых для выставления счетов абонентам. Станция сопряжения состоит из трех приемопередающих терминалов, быстродействующего процессора, в котором находится база данных, и коммутационного оборудования для связи с местной ТФОП.

Приемопередающие терминалы функционируют следующим образом:

- первый терминал вступает в связь с $КА_i$, второй – с $КА_{i-1}$;
- после ухода из зоны $КА_i$ первый терминал вступает в связь с $КА_{i-2}$;
- после ухода из зоны $КА_{i-1}$ второй терминал вступает в связь с $КА_{i-3}$.

Быстродействующий процессор осуществляет идентификацию абонентского терминала и формирует адресацию в направлении вызываемого персонального терминала или абонента ТФОП.

Коммутационное оборудование взаимодействует с одной стороны с процессором, а с другой – с ТФОП.