

## Система фиксированной спутниковой связи USAT на основе метода CDMA с переключением лучей на борту

**USAT (Ultra Small Aperture Terminal)** – это двухсторонние абонентские станции типа VSAT, предназначенные для работы в Ka-диапазоне и передачи низкоскоростных данных. Под этим термином подразумеваются системы, которые имеют антенны с зеркалом диаметром менее 1,2м (обычно 25-30см). Первоначально абонентские станции USAT создавались для мобильной связи. В частности, компанией Qualcomm создана мобильная связанная система Omnitrac, предназначенная для организации мобильной связи через арендуемые ретрансляторы Ka-диапазона. В настоящее время они модифицированы для неподвижных наземных станций. В терминалах такого типа рекомендуется применение сложной смешанной модуляции с расширением спектра, что позволяет снизить уровень помех в канале.

Бортовое оборудование спутника во многом определяет функциональные возможности системы связи, созданной на его основе. После запуска на орбиту это оборудование не может быть модернизировано или хотя бы отремонтировано. Следовательно, бортовое оборудование должно быть максимально простым и надежным. Вот почему большинство спутников связи до сих пор представляют собой простые ретрансляторы сигналов без какой-либо их обработки на борту. При другом подходе к построению системы на борту могут производиться демодуляция/модуляция сигналов, а также их декодирование/кодирование, коммутация лучей и коммутация с маршрутизацией передаваемых данных. В понятие обработки на борту следует также включить и организацию межспутниковых линий связи, соединяющих спутники между собой. Широкое применение межспутниковых линий связи позволяет построить полностью автономную и достаточно развитую спутниковую сеть связи.

Эффективность протоколов множественного доступа зависит как от характеристик среды передачи, так и от особенностей передаваемого трафика. Большие задержки распространения сигналов в спутниковых системах связи, особенно при использовании геостационарных спутников, делают невозможным использование тех протоколов MAC, которые разрабатывались для наземных проводных и беспроводных локальных сетей (таких как, например, протокол CSMA). Кроме того, низкая энергетика спутниковых каналов контрастирует с условиями передачи данных в наземных системах связи. Интернет – трафик по своей природе является пульсирующим. Обеспечение требуемого качества обслуживания (QoS) пока ограничено применением механизма «наибольшего усилия» (best-effort) для трафика различной природы. Таким образом, перспективные протоколы множественного доступа должны поддерживать приоритезацию различных классов трафика. Например, приоритет трафика реального времени обычно устанавливается выше, чем для других классов.

Случайный доступ наиболее предпочтителен для сетей с большим числом малогабаритных (таких как USAT) низкоскоростных терминалов, генерирующих пульсирующий трафик. Число терминалов в таких сетях может достигать сотен и тысяч единиц. Согласно протоколу случайного доступа (Aloha или его вариаций), каждый терминал передает свои данные независимо от других, в результате чего могут иметь место коллизии пакетов. Повторные передачи после коллизий вызывают увеличение средней задержки передачи пакетов и ее дисперсии, а также снижают эффективность использования спутникового моноканала на уровне всей сети.

Хотя случайный доступ лучше подходит для сетей с большим числом терминалов, он, тем не менее, не гарантирует QoS. Протоколы, относящиеся к классу DAMA (Demand Assignment Multiple Access), пытаются разрешить это противоречие путем организации динамического распределения пропускной способности ретранслятора в зависимости от требований пользователей. Запросы пользователей о выделении части ресурса спутникового ретранслятора должны быть переданы до начала передачи пользовательских данных. Как правило, запросы передаются в режиме случайного доступа. После успешного резервирования запрошенного ресурса передача пользовательских данных происходит уже в бесконфликтном режиме.

В системах USAT предпочтение отдается методу множественного доступа CDMA. В системах с CDMA каждому терминалу выделяется уникальная кодовая последовательность, с помощью которой расширяется спектр его сигнала. Если кодовые последовательности ортогональны, то все другие сигналы выступают в качестве аддитивного шума и могут быть эффективно ослаблены на приемной стороне. Кроме того, с точки зрения масштабирования сети с протоколом CDMA являются самыми простыми.

В США в рамках проекта NASA под названием Advanced Communication Technology Satellite (ACTS) запущен ИСЗ, являющийся демонстрацией новых технологий в коммуникационных системах Ka-диапазона. Спутник ACTS имеет антенную систему, способную реализовать пучок лучей с узкой диаграммой направленности и большой ЭИИМ, что позволяет наземным станциям поддерживать приемлемый трафик при очень малых размерах антенн и низком уровне мощности их передатчиков. В результате снижается стоимость наземных станций. Другими важными особенностями данного

спутника являются наличие бортового процессора основной полосы и применение широкополосных транспондеров.

В рамках программы Lewis Research Center's Space Communication Program была изготовлена малая наземная станция USAT, которая предназначалась для проведения экспериментов со спутником ACTS для технологической проработки и демонстрации возможностей. Наземная станция USAT имеет удобную для эксплуатации модульную конструкцию. Она содержит пять основных модулей, которые легко собираются и обслуживаются. Подсистемы USAT – это антенна (35-60см), малошумящий понижающий преобразователь, передатчик, объединяющий мощный повышающий преобразователь и усилитель мощности, подсистема генераторов (гетеродин повышающего и понижающего конверторов и системный опорный генератор). Структурные схемы наземной станции USAT показаны на рисунках 1, 2, 3, а ее общий вид – на рисунке 4.

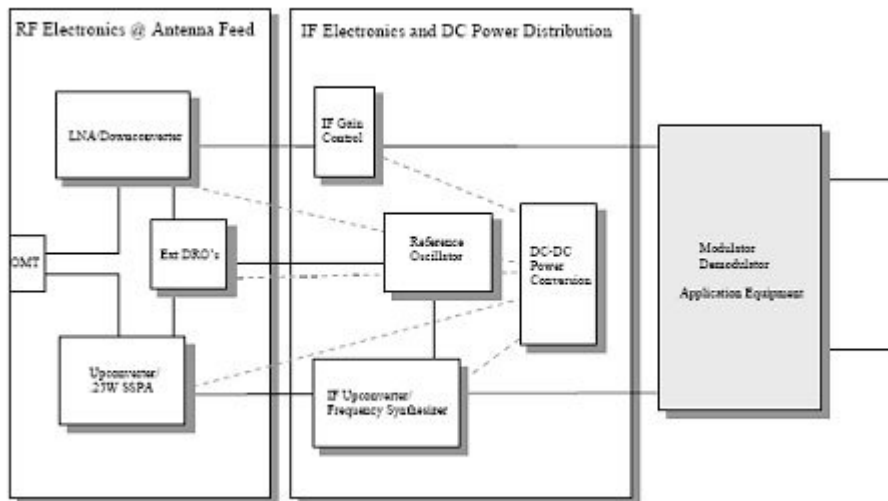


Рисунок 1. Структурная схема наземной станции USAT

Компания Lewis Research Center представила разработку наземной станции USAT для передачи данных со скоростью до 1,5Мбит/с в режиме передачи и 40Мбит/с в режиме приема. Терминал содержит осесимметричную параболическую антенну с диаметром зеркала 35см, на которой установлены твердотельный усилитель мощности и малошумящий понижающий преобразователь. Для реализации цифровых сервисов в режиме «из точки в точку» был применен коммерческий модем с переменной скоростью данных (от 9,6Кбит/с до 10Мбит/с) и со стандартным интерфейсом RS-449/RS-232.

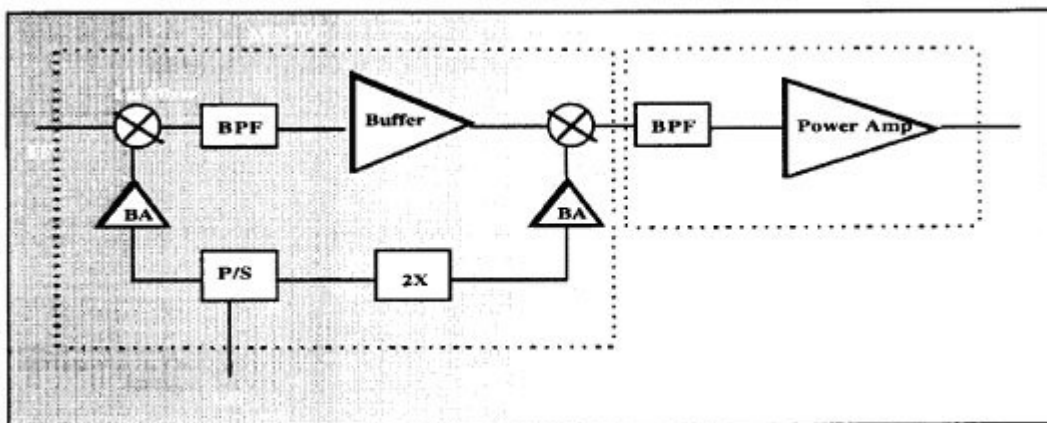


Рисунок 2. Структурная схема мощного повышающего преобразователя передатчика на 30ГГц (HPU).

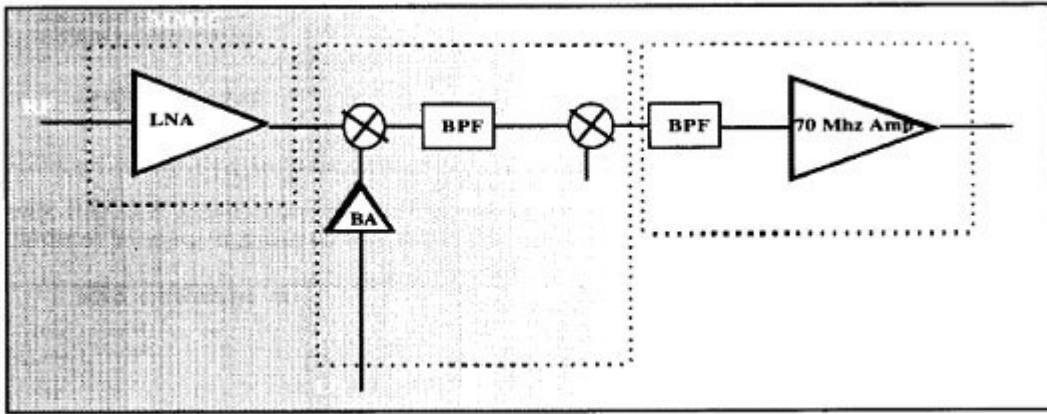


Рисунок 3. Структурная схема приемника на 20ГГц с понижающим преобразователем (LND).



Рисунок 4. Наземная станция USAT в сборе.

Исследованиям данного класса устройств посвящена статья "A Satellite-Switched CDMA System for Fixed Service Communication", опубликованная в журнале "IEEE Communication Magazine" (July 1999) (авторы: Diakoumis Gerakoulis, Robert Miller, and Saeed Ghassemzadeh, AT&T Laboratories, Evaggelos Geraniotis, University of Maryland). Рекомендуем читателям перевод данной статьи, которая, на наш взгляд, содержит много интересных сведений.

Химич П.В., гл. специалист ЗАО «РОКС»

## Введение

Спутниковая система связи с переключением лучей и с множественным доступом на основе метода кодового разделения – это система, предложенная для фиксированной спутниковой службы с использованием ИСЗ, располагающегося на геостационарной орбите. Примененный в ней метод SS/CDMA обеспечивает как множественный доступ, так и переключение на многолучевом спутнике. В данной статье представлены архитектура системы и особенности ее работы. Оборудование SS/CDMA состоит из общего эфирного интерфейса (CAI) и бортового устройства кодового переключения. Устройство переключения CAI осуществляет управление направлением передачи сигнала и трафиком каналов. Трафик канального доступа и метод модуляции основаны на спектрально - эффективной схеме CDMA. Спутниковый кодовый переключатель разделения лучей (CDS) направляет вызовы от восходящего к соответствующему нисходящему лучу без демодуляции и декодирования канала на борту. Эта система работает по методу управления по требованию, то есть полоса пропускания канала и направления переключения определяются только запросом пользователя. Система может поддерживать большое разнообразие битовых скоростей при качестве обслуживания, присущем проводным линиям. Предоставляются услуги по индивидуальному вызову как для схемы переключения данных голоса и видео, так и для схемы пакетного переключения данных. В работе показано, что предложенный метод SE-CDMA может позволить достигнуть высокой производительности и очень низких коэффициентов битовых ошибок при низких значениях отношения сигнала-к-шуму. Кроме того, инновационная техника переключения позволяет уменьшить сложность оборудования и дает возможность достигнуть при этом высокой пропускной способности для всех типов услуг.

Наборы услуг, которые должны предоставляться перспективными геостационарными спутниковыми системами, предполагают непосредственную двухстороннюю связь между конечными пользователями спутниковой системы, имеющими терминалы с ультрамалой апертурой (USAT). Основное требование к этому типу обслуживания – это способность направления запроса на борту ИСЗ, то есть предполагается, что спутник будет одновременно работать не только как ретранслятор, но также как центр переключения. Однако предоставление таких услуг может стать с экономической точки зрения интересным только в том случае, если информационная емкость и пропускная способность системы связи будут достаточно высокими при качестве обслуживания, сравнимом с качеством обслуживания для проводных линий. Для достижения этой цели система должна обеспечивать самую высокую спектральную эффективность при эффективном использовании массы и мощности бортового оборудования. Высокая спектральная эффективность достигается путем внедрения многолучевой антенной системы, которая позволяет повторно использовать имеющийся частотный спектр. Более того, требующаяся от передатчиков мощность должна быть уменьшена путем внедрения новых методов доступа и модуляции. Данные методы позволяют обеспечивать очень низкое отношение сигнал/шум, которое требуется при использовании систем USAT (с антеннами диаметром не более 26 дюймов).

Предлагаемый для решения этих задач метод – это метод кодового переключения лучей на ИСЗ совместно с методом кодового разделения каналов (SS-CDMA). Такое построение вначале рекомендовалось как часть спутникового проекта AT&T VoiceSpan® при сохранении применения FCC Ka-band. Метод SS-CDMA решает задачи и множественного доступа, и переключения на спутнике. При этом метод доступа в восходящем канале основывается на CDMA, а в нисходящем канале – на мультиплексировании с кодовым разделением (CDM), в то время как переключение на борту - на соответствующей технологии, которая также использует кодовое разделение (CDS). Система работает по методу управления с предоставлением по требованию, то есть изменение диапазона канала обслуживания и переключение соединений осуществляются только по требованию пользователя. С помощью метода SS-CDMA можно достичь высокой спектральной эффективности при повторном использовании частот (за счет возможного повторного использования спектра в некоторых лучах). В дополнение к перечисленному, данный метод реализует эффективное переключение лучей, которое позволяет осуществить прямую маршрутизацию из конца в конец линии с минимальной обработкой и без буферирования сигнала на борту. Система может поддерживать фиксированные режимы для сервисов, требующих схемно-переключаемых вызовов (голос, данные и видео) и пакетно-переключаемых данных.

Относительно метода, основанного на множественном доступе с временным разделением (TDMA), который назывался методом TDMA с переключением на спутнике (SS-TDMA), то он предлагался ранее для цифровых сервисов, предполагавших пакетное переключение [1, 2]. Для системы SS-TDMA методом множественного доступа является TDMA, а переключение основывается на временном мультиплексировании (TMS). Простая система с TDMA запросом используется также в спутнике ACTS для трафика с малой скоростью переключения пакетов [3]. К сожалению, метод TDMA позволяет получить отношение повторно используемых частот к их общему количеству только 1/4 или 1/7, несмотря на то, что при большом количестве переключений оборудование для переключения и алгоритм управления могут быть более сложными.

Описание системы SS-CDMA дано в последующих разделах, так же как и описание блоков передатчика, приемника, а также механизмов управления и переключения.

## Описание системы

Конфигурация сети для предлагаемой системы SS/CDMA показана на рисунке 1. Каждый из спутников имеет прямые линии связи с оборудованием, располагаемым в помещении пользователя (CPE), шлюзами в офисах или другими спутниками (межспутниковые линии). Спутники должны направлять вызовы от одного CPE к другому CPE или от CPE к телефонной сети общего пользования (PSTN) через офисный шлюз. Реализация спутниковой сети предполагается в пределах открытого Ка-диапазона (28ГГц). При этом особенности проектирования системы SS/CDMA мало зависят от ее рабочего диапазона. При использовании спутниковых сетей предоставляется возможность реализации фиксированных сервисов как для пакетного, так и для схемного режимов переключения. Сервисы, предполагающие схемные переключения, предназначены для голоса, видео и данных, так как пакетное переключение применяется только для передачи данных. Битовые скорости для схемно-переключаемых источников голоса и данных равны 64, 32 и 16Кбит/с, а основная скорость интегрирующих различные сервисы цифровых сетей (ISDN) равна 144Кбит/с (2B+D). При этом для передачи видео со скоростью

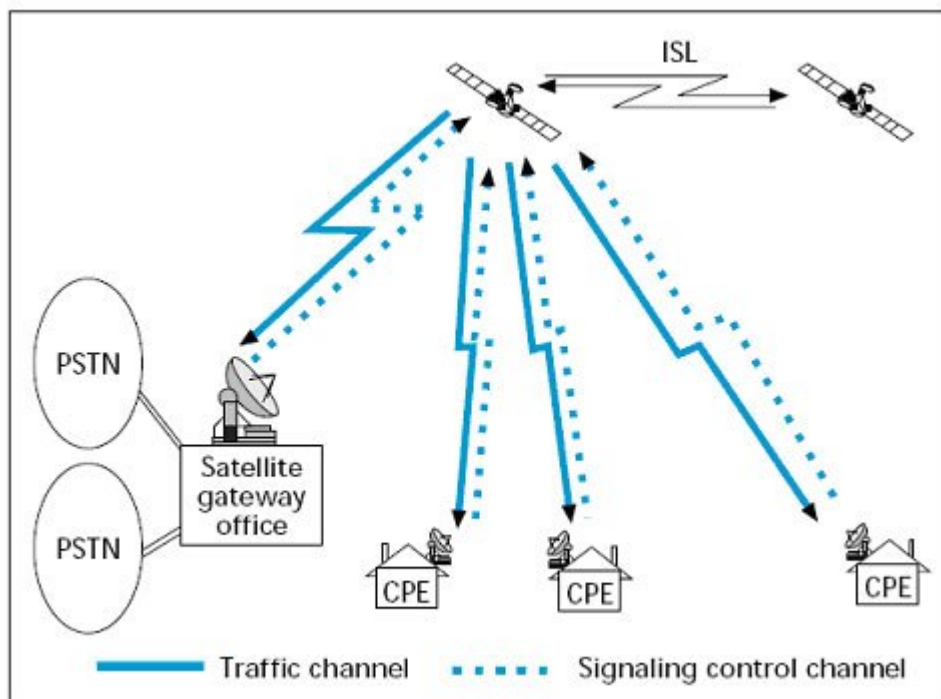


Рисунок 1. Коммуникационная сеть фиксированной спутниковой связи

384Кбит/с и T1 (или E1) требуются скорости 1544 (или 2048)Кбит/с. Сервисы ISDN потребуют коэффициентов ошибок на уровне  $10^{-6}$  и меньше, а сервисы видео -  $10^{-8}$  или меньше. Спутниковые сети поддерживают также сервисы, требующие пакетного переключения.

### Множественный доступ и переключение

Для многолучевых спутников метод SS/CDMA позволяет осуществить и множественный доступ, и переключение. Проблема множественного доступа решается путем пространственного, частотного и кодового разделения.

Множественный доступ с пространственным разделением достигается за счет использования остронаправленных антенн с целью повторного использования частот в некоторых лучах. Частотное разделение вводится за счет разбиения частотного спектра на несколько частотных диапазонов, каждый из которых имеет соответствующую полосу  $W$  ( $W \sim 10$ МГц). Затем в каждой из полос частот и в каждом из лучей производится разделение по методу CDMA. При методе CDMA данные пользователя расширяются до полосы  $W$ .

На ИСЗ также реализуется функция переключения лучей. Таким образом, каналы пользовательского трафика могут переключаться с любого луча восходящей линии на любой из лучей нисходящих линий, что достигается за счет бортового переключателя с кодовым разделением (CDS).

Построение системы SS/CDMA показано на рис.2. Она содержит космический сегмент (ИСЗ) и CPE. Каждый CPE содержит оборудование терминала (TE) и блок спутникового подписчика (SU). Каждый SU содержит блок передатчика для доступа к трафику каналов (ACTU и TCTU) и блок приемника для каналов синхронизации и персонального вызова (S&PRU), равно как и для трафика каналов (TCRU). Блок SU также содержит блок управления вызовом (CCU). Структурная схема бортовой системы содержит переключатель с кодовым разделением (CDS), блок управления (CU), а также приемник и передатчик для доступа (ACRU) и передачи спутниковых вещательных каналов (SBTU). Описание структуры и параметры передающей системы будут даны позже, после описания CDS и результатов испытаний пропускной способности.

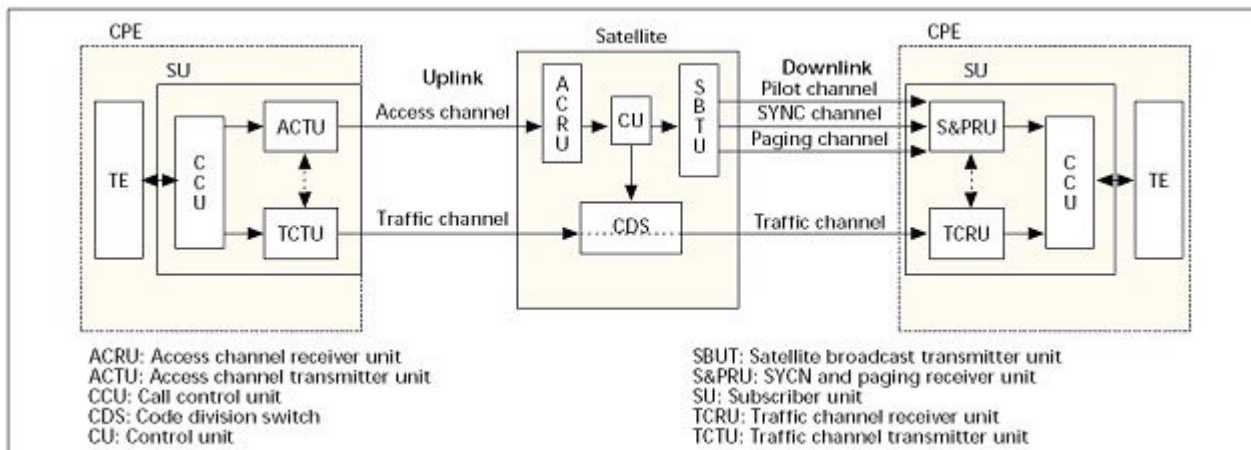


Рисунок 2. Архитектура системы SS/CDMA.

### Общий эфирный интерфейс

Общий эфирный интерфейс (CAI) – это интерфейс между спутниковым блоком и блоком подписчика или офисным шлюзом. Он содержит каналы управления трафиком и режимами передачи сигналов. Каналы управления необходимы для доступа в восходящую линию, а также для передачи пилот-сигнала, сигналов синхронизации и персонального вызова в нисходящей линии. Эти каналы работают в выделенных полосах частот. За счет использования в системе пилот-канала и канала синхронизации производятся хронирование и синхронизация, в то время как каналы доступа и персонального вызова направляют сообщения к спутнику или от спутника. С другой стороны, каналы трафика передают голос, данные и информацию о процессе передачи напрямую между блоками конечных пользователей. Множественный доступ и модуляция для каналов трафика основывается на обладающем высокой спектральной эффективностью методе множественного доступа с кодовым разделением (SE-CDMA), который был уже представлен ранее. При использовании метода SE-CDMA осуществляется ортогональное разделение каналов трафика внутри луча. В зависимости от особенностей применения метода SE-CDMA лучи спутника могут дополнительно быть разделены с помощью ортогональных кодов. На борту каналы трафика переключаются между лучами восходящей и нисходящей линий без декодирования данных.

Передающая система SS/CDMA

### Каналы управления

Каналы управления представляют собой каналы доступа в восходящей линии и спутниковые вещательные каналы в нисходящей линии. Каждый из них выделяет частотный диапазон на луч, который имеет расширение до полосы  $W$  ( $W \sim 10\text{МГц}$ ). Доступ в канале является асинхронным, а передача соответствует протоколу Доступа с Расширением Псевдослучайной Последовательностью – Spread Spectrum Random Access (SSRA). Канал SSRA не разделяется на слоты, а шифруется уникальным псевдослучайным шумовым кодом (PN)  $g_i(t)$  в каждом из  $i$  лучей. Поскольку каждый из ACTU может начать свою передачу случайно в любой момент времени (в течение достаточно продолжительного промежутка времени), фазовый сдвиг PN кода в приемнике может принять любое из возможных значений  $g_i(t - nT_c)$ . На стороне приемника должно быть установлено множество параллельных схем детектирования доступа в канале (ACDS) для детектирования и сжатия принятого сигнала при любом фазовом сдвиге. Совокупность параллельных ACDS производит параллельную комбинацию с последовательными схемами получения данных. Каждый ACDS выбирает сообщения для синхронизации путем корреляции внутри окна из  $w$  чипов. Приняв количество чипов равным  $L$ , длину PN кода -  $g_i$  и  $k$  – количество параллельных ACDC, получим размер окна  $w = L/k$

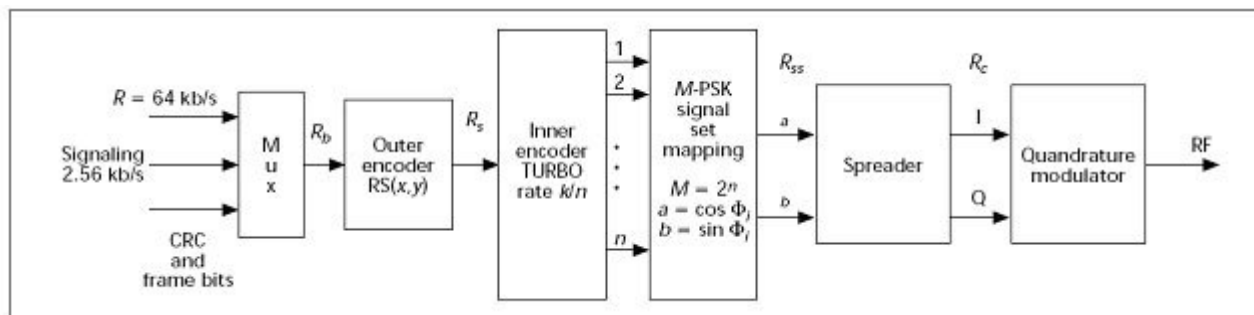


Рисунок 3. Мультиплексирование, каналное кодирование, модуляция и расширение в системе SE-CDMA.

Корреляция выполняется в продолжение интервала времени получения преамбулы. Таким образом,

сигналы, которые направляются в приемник с фазовым сдвигом более одного чипа, будут распознаны и приняты. Сообщения, которые имеют некорректируемые ошибки, будут передаваться повторно после случайной задержки до тех пор, пока не будут успешно приняты и распознаны. Все попытки доступа, сделанные в канале доступа, должны быть приняты заданным каналом персонального вызова. В дополнение к направлению сообщений доступа канал доступа должен также использоваться для синхронизации канала трафика.

Нисходящие спутниковые вещательные каналы – это один пилот-канал, один канал синхронизации и несколько каналов персонального вызова на каждый луч. Каждый из этих каналов идентифицируется ортогональным (канальным) кодом и PN кодом луча. Пилот-канал передается постоянно и не содержит данных. Каждый спутниковый луч идентифицируется фазовым сдвигом в пилотном PN коде. Канал синхронизации передает информацию о синхронизации в луче к SU для приема канала индивидуального вызова и передачи по каналу доступа. Каналы персонального вызова используются для передачи пейджинговой информации и попыток запросов канального доступа.

### Каналы трафика

Канал трафика производит прямое соединение между конечными SU. Линия связи включает три сегмента: восходящую линию, переключатель и нисходящую линию. Процедуры множественного доступа и модуляции в канале трафика основываются на схеме SE-CDMA [5]. Схема SE-CDMA характеризуется следующими особенностями:

- Ортогональной схемой CDMA, которая использует оптимизированную последовательность кодов коррекции ошибок и модуляцию, позволяющую эффективно использовать полосу частот. Ортогональный код длиной  $L$  чипов будет занимать промежуток больший, чем длина входящего символа.
- Последовательность кодов содержит внешний код Рида-Соломона (RS)  $(x, y)$  (с отношением  $y/x$ ) и внутренний турбо-код с отношением  $k/n$ . Входные биты, после образования кадров, сначала поступают на RS кодер, а затем на турбо-кодер, и только после этого подвергаются расширению и модулируют несущую, используя  $M$  - кратную манипуляцию фазовым сдвигом (M-PSK),  $M = 2^n$ . Ортогональная последовательность расширения будет распределена по длине  $M$ -кратного символа на входе расширителя.
- SE-CDMA производит ортогональное разделение всех каналов (пользовательского) трафика внутри диапазона  $W$  ( $W \sim 10$  МГц). Это достигается путем ассигнования ортогональных кодов для каждого канала трафика. В дополнение ортогональные и/или PN коды используются для разделения спутниковых лучей (коды лучей).
- метод SE-CDMA может быть внедрен как полностью ортогональный (FO), главным образом ортогональный (MO) или полуортогональный (SO). Все эти варианты применения производят ортогональное разделение всех каналов трафика (пользовательского) для каждого из лучей. В дополнение к этому FO/SE-CDMA производит ортогональное разделение первого уровня спутниковых лучей (четыре лучей). В методе MO/SE-CDMA используют два ортогональных луча на первом уровне, в то время как в методе SO/SE-CDMA используют PN коды для разделения всех лучей.
- Принципы работы в режиме расширения для FO, MO и SO/SE-CDMA показаны на рисунке 4. Методы FO и MO SE-CDMA требуют генераторов ортогональных кодов  $L_1$  и  $L_2$  для разделения пользователей и лучей соответственно. Расширение производится в два этапа, во-первых, со скоростью  $R_{c1}$ , а во-вторых, со скоростью  $R_{c2}$  (сверхрасширение). Для метода FO/SE-CDMA  $R_{c2} = 4R_{c1}$ , в то время как для метода MO/SE-CDMA  $R_{c2} = 2R_{c1}$ . Таким образом, генератор  $(I, Q)$  PN кода используется для предотвращения интерференции от лучей второго уровня. Его отношение равно  $R_{c1}$ . В системе SO/SE-CDMA расширение содержит  $L$  ортогональных пользовательских кодов и PN код луча.

Основополагающая структурная схема системы SE-CDMA показана на рис.3. Системные параметры для каждого из применений (FO, MO и SO) приведены в Табл.2. Выбор отдельного исполнения SE-CDMA должен основываться на типах обслуживания или типе канала, а также требуемом коэффициенте ошибок (BER),  $E_b/N_0$  и информационной емкости. В методе SE-CDMA используют вспомогательные символы для когерентного детектирования [7]. Внешний кодер Рида-Соломона  $RS(x, y)$  производит символьную скорость  $R_s$ . Рассматриваемые здесь турбо – коды могут использоваться как с параллельно следующими за ними сверточными кодами (PCCC) [1], так и с последовательно следующими сверточными кодами (SCCC) [2], разработанными для перемежителя малого размера. Кодовые отношения для турбо-кодов приведены в Табл.1. На выходе турбо-кодера генерируются  $n$  параллельных символов, которые преобразуются в созвездие M-PSK ансамбля сигналов  $M=2^n$ . В методах MO и SO/SE-CDMA используется четырехпозиционная PSK (QPSK), в то время как в методе FO/SE-CDMA используется 8-PSK.

Методы расширения для FO, MO и SO/SE-CDMA показаны на рис.4. Синфазная и квадратурная составляющие расширяются под действием одних и тех же ортогонального и PN кодов. Скорость чипов для FO и MO применений показана в Табл.2. Применение FO требует 60 ортогональных кодов для каналов пользовательского трафика и четырех ортогональных кодов для выбора спутниковых лучей. Рисунок 5 показывает пример повторного использования четырех ортогональных кодов лучей. В итоговом образце все лучи на первом уровне ортогональны, в то время как лучи второго уровня выбираются с помощью кодов PN.

Точно так же в применение MO используется 60 ортогональных кодов для пользовательских каналов трафика и два ортогональных кода для разделения лучей. В системе SO/SE-CDMA обработка расширением содержит ортогональный пользовательский код и коды PN для выбора лучей. Ортогональные коды, которые требуют длины  $L$ , должны генерироваться в соответствии с функцией Hadamard-Walsh мощностью  $2(L = 2^k)$ . Если  $L$  не соответствует мощности 2, то используется метод квадратичных остаточных кодов. При следующей операции расширения результирующие образцы I и Q сигналов ограничиваются по полосе в финитном цифровом формирующем импульсе (FIR) фильтре.

### **Синхронизация и хронирование**

В системе SE-CDMA все каналы трафика в восходящей линии должны быть задействованы для синхронного ответвления ко всем устройствам сжатия с целью получения ортогональности между каналами трафика как внутри каждого луча, так и между лучами.

Механизм синхронизации основан на петле обратной связи, содержащей бортовую схему синхронизации (SYNC) и управляющую схему SU SYNC. Бортовая настроечная схема на первом этапе включает в себя ключевую схему задержки, которая выделяет временной джиттер  $Z_{\Delta}$ . Величина временного джиттера  $Z_{\Delta}$  должна быть определена из сообщения и передана к CCU в US.

Управляющая схема SU SYNC должна затем передать как входной сигнал для схемы временной подстройки канала трафика в восходящем канале. Параметры представленной управляющей подстройкой схемы даны в [8].

### **Информационная емкость и серии параметров**

Параметры выходов передающих систем SS/CDMA соответствуют тем же требованиям, что и для всех линий передачи в восходящем направлении для каналов трафика, и должны ответвляться синхронно на спутниковое устройство сжатия (despreader) (с точностью до 10-ти процентов длины чипа). Такая точность достигается за счет систем синхронизации и хронирования, которые были представлены ранее и анализировались в [8]. Если предположить, что такая система имеется в распоряжении, метод SE-CDMA должен быть оптимизирован для достижения качества обслуживания (QoS) и заданной информационной емкости. Например, метод SE-CDMA может достигнуть очень низкого отношения  $E_b/N_0$  (3–5 дБ) при очень низком BER

(от  $10^{-6}$  до  $10^{-10}$ ). Очень низкое отношение  $E_b/N_0$  также позволяет в достаточной степени компенсировать потерю выходной мощности (ОВО) в усилителе мощности (TWT).

При использовании метода SE-CDMA информационная емкость определяется тем, какое максимальное количество каналов пользователей или трафика могут передаваться в каждой полосе по 10МГц. Емкость системы для FO и MO применений равна отношению  $R_c/R_{ss}$ , в то время как применение SO имеет информационную емкость, равную отношению  $R_c/R_{ss}$  (Табл.2). Емкость для SE-CDMA и соответствующий BER, а также отношение  $E_b/N_0$  для FO, MO и SO применений показаны в Табл. 3. Эти результаты получены аналитическим путем в [4] и основываются на предположении, что используется когерентное детектирование. При моделировании величины отношения  $E_b/N_0$  для MO и SO предполагалось, что половина из окружающих лучей имели кросс-поляризационную развязку – 6дБ. Кроме того, предполагалось наличие идеальной синхронизации и ортогонального кодирования. Информационная емкость, показанная в Табл. 3, соответствует 100-процентной загрузке для FO и MO и 75-процентной – для SO применений и битовой скорости 64Кбит/с. Как видно из таблицы, при использовании метода MO/SE-CDMA достигается более низкое отношение  $E_b/N_0$ . Оно составляет около 4дБ для BER 10<sup>-10</sup> и является следствием существенной степени компенсации ОВО в TWT.



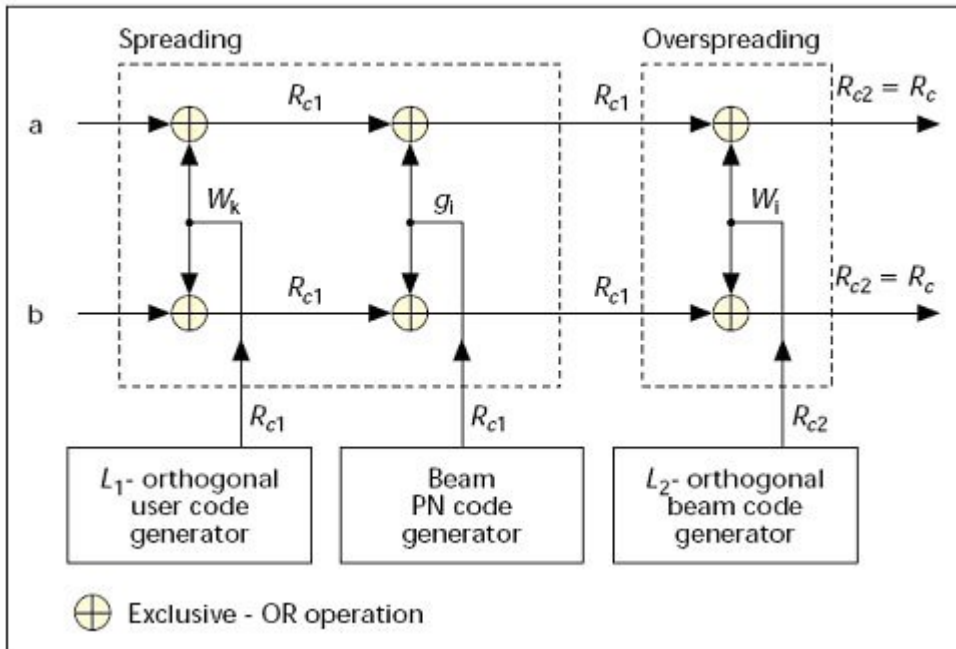


Рисунок 4. Обработка для расширения при FO ( $R_{c2} = 4R_{c1}$ ), MO ( $R_{c2} = 2R_{c1}$ ) и SO/SE-CDMA с  $R_{c1} = R_{c2}$  ( $w_i$  опущено).

Влияние увеличения загрузки системы в пределах от одного до 60-ти пользователей на отношение  $E_b/N_0$  при BER  $10^{-6}$  показано в Таблице 4 для FO, MO и SO. Как видно, влияние 100-процентной загрузки на систему FO составляет около 0,1дБ; на MO –это 1,5дБ, в то время как для SO это влияние более 11дБ при 75-процентной загрузке. Это свидетельствует о том, что MO, и особенно SO, могут иметь ограниченное применение из-за интерференции с другими лучами. Таким образом, использование голосовой связи при внедрении SO связано с некоторыми особенностями. Требуемое для  $10^{-6}$  отношение  $E_b/N_0$  при наличии голосовой активности равно всего 4,3дБ. Влияние поддерживающей символ демодуляции на отношение  $E_b/N_0$  моделировалось аналитически и определено на уровне от 0,8 до 1дБ ниже, чем для когерентной демодуляции.

Другие параметры определяются задержкой в канале. При относительно длительной полной задержке распространения для спутника (200мсек), главное требование к каналу доступа – это обеспечение большой вероятности успеха при минимизации времени установления вызова при первой же попытке. Как показано в [8], где задается специфический набор параметров, вероятность успешной пакетной передачи составляет 0,95 для загрузки до 10 посылок/сек.

### Переключающая система SS/CDMA

Система SS/CDMA реализует механизм переключения на борту, который маршрутизирует трафик каналов от любого из  $i$  восходящих лучей к любому из  $j$  нисходящих лучей. Архитектура бортовой системы содержит блок приемника канального доступа (ACRU), блок вещательного спутникового передатчика (SBTU), блок управления (CU) и CDS (Рис.6). Блоки ACRU и SBTU управляются за счет передачи сообщений к/или от CU, в то время как CDS осуществляет маршрутизацию трафика каналов. Пока трафик каналов маршрутизируется посредством CDS, передача управляющих сообщений осуществляется по каналам управления с обработкой в CU.

### Переключатель на основе кодового разделения

Система переключения содержит модули CDS или переключателя с кодовым мультиплексированием (CMS). Каждый из модулей маршрутизирует вызовы между  $N$  восходящих лучей и  $N$  нисходящих лучей ( $N=32$ ), где каждый луч содержит одну полосу частот CDMA ( $W + 10$  MHz). Таким образом, получаем размеры модуля CDS ( $N L_u \times N L_u$ ), где  $L_u$  – это количество каналов трафика в полосе SE-CDMA.

Структурная схема блока CDS показана на Рис. 7. Каждый восходящий канал CDMA сначала преобразуется вниз до промежуточной частоты (IF), а затем и до основной полосы (BB) без демодуляции входящих сигналов. (Возможность переключения на IF также должна быть рассмотрена.) Затем сигналы сжимаются при помощи  $w_i$  ортогональных кодов лучей и  $c_i$  PN кодов лучей. Схема восстановления трафика каналов (TCRC) затем восстанавливает каждый специфический сигнал пользователя. Это достигается за счет сжатия при помощи пользовательского ортогонального кода  $w_k$ . Сигнал затем повторно расширяется с помощью пользовательских ( $w_m$ ) кодов и кодов нисходящих лучей ( $c_j, w_j$ ). Наконец, сигнал опять подвергается дополнительному расширению за счет ортогонального кода  $w_n$ , имеющего скорость чипов  $R_{c3}$ ,  $n = 1, 2, \dots, L_s$ . Количество кодов  $w_n$ , равное  $L_s$ , соответствует количеству переключаемых портов  $N$  ( $L_s = N$ ), в случае, если не применено ортогональное разделение между существующими восходящими лучами.

В каждом из случаев скорость  $R_{c3} = N \times R_{c1}$ . Однако когда используется применение FO или MO-CDMA,  $L_b$  лучей всегда будут ортогональны. ( $L_b = 4$  для FO и  $L_b = 2$  для MO применений). Предположим, что  $L_s = N/L_b$ , а  $R_{c3} = (N/L_b) \times R_{c2}$ .

Implementation	Outer encoder	Inner encoder	Modulation	Orthogonal beam reuse
Fully orthogonal (FO) FO-1	RS(16λ, 15λ)	Turbo Rate 2/3	8-PSK	1/4
Mostly orthogonal (MO) MO-1	RS(16λ, 15λ)	Turbo Rate 1/2	QPSK	1/2
Semi-orthogonal (SO) SO-1	RS(16λ, 15λ)	Turbo Rate 1/3	QPSK	1

Таблица 1. Альтернативные применения для SE-CDMA

Rates	I	II	VII
$R$ (kb/s)	64	64	64
$R_b$ (kb/s)	76.8	76.8	76.8
$R_s$ (ks/s)	81.92	81.92	81.92
$R_{ss}$ (ks/s)	40.98	81.92	122.8
$R_{c1}$ (Mc/s)	2.4576	4.9152	$R_c = R_{c1} = R_{c2}$
$R_c = R_{c2}$ (Mc/s)	9.8304	9.8304	9.8304
$R_{c1}/R_{ss}$	60	60	60
$R_{c2}/R_{c1}$	4	2	1

Таблица 2. Системные битовые скорости для каждого из вариантов применения SE-CDMA при исходной скорости источника сигнала  $R=64Kбит/с$ .

Каждый из восходящих лучей в кластере должен быть дополнительно расширен одним и тем же  $w_n$  ортогональным кодом. Например, если  $N = 32$  и  $L_s = 8$ , то  $R_{c3} = 78,6432Mчипов/с$ .

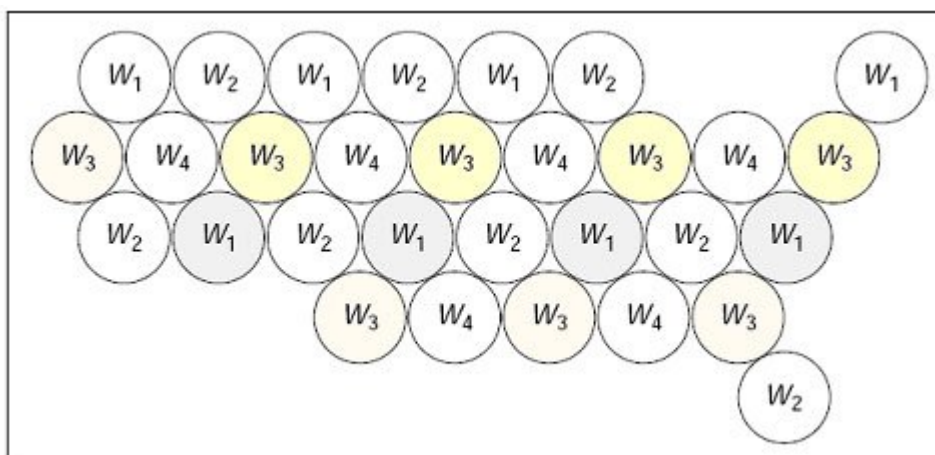


Рисунок 5. Повторное использование ортогональных кодов лучей при 4-х ортогональных кодах для системы из 30-ти лучей, покрывающих континентальную часть территории США

Channel type	C <sup>1</sup>	Required BER	E <sub>b</sub> /N <sub>0</sub> (dB)			
			BER	FO	MO	SO <sup>2</sup>
I	60	10 <sup>-6</sup>	4.95	3.8	11.65	4.3
II	120	10 <sup>-6</sup>	4.95	3.8	11.65	4.3
III	240	10 <sup>-4</sup>	4.9	3.65	11.55	4.0
IV	30	10 <sup>-8</sup>	4.98	3.8	11.65	4.3
V	10	10 <sup>-8</sup>	4.98	3.9	11.85	4.3
VI	2	10 <sup>-10</sup>	5.05	4.05	12	4.52
VII	2	10 <sup>-10</sup>	5.05	4.05	12	4.52

<sup>1</sup> Capacity is the number of traffic channels per 10 MHz.  
<sup>2</sup> Voice activity is utilized.

Таблица 2. Минимально достижимое отношение E<sub>b</sub>/N<sub>0</sub> для каждого из вариантов применения SE-CDMA (FO, MO и SO) и соответствующие им емкости и требуемая величина BER.

После дополнительного расширения все входящие сигналы объединяются (путем суммирования) в единый поток, называемый шиной с кодовым разделением (CDB). Шина CDB объединяет все нисходящие лучи, так чтобы каждый луч мог быть восстановлен за счет схемы сжатия после дополнительного расширения и направлен по своему назначению.

За этим следует повышающее преобразование сигнала ВВ в сигнал IF и далее в RF для передачи в нисходящей линии. Набор всех кодов в TCRC для маршрутизации сигналов по их назначениям обеспечивается за счет CU. Необходимое для каждого из лучей количество TCRC равно Lu и равно количеству каналов трафика на луч (емкость луча), при котором еще не наступает блокирование переключателя.

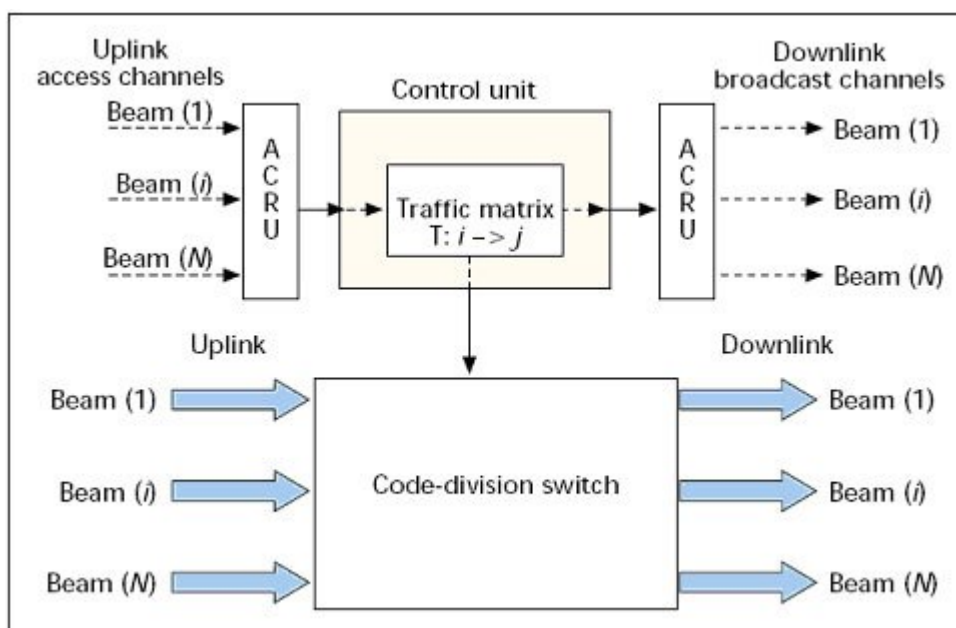


Рисунок 6. Коды переключения для SS/CDMA.

Блок CDS, как будет указано далее, представляет собой неблокируемый переключатель. Поэтому необходимое количество TCRC составляет N<sub>Lu</sub> для модуля CDS с размерами (N<sub>Lu</sub>) X (N<sub>Lu</sub>), пропорциональными количеству входов и выходов переключателя. Анализ предложенного здесь CDS, также как и альтернативная архитектура CDS представлены в [9]. Операции сжатия и повторного расширения в TCRC осуществляются на ВВ. Сжатый в TCRC сигнал не требует канального

декодирования и повторного кодирования. Поэтому M-позиционные символы могут быть извлечены и регенерированы после повторного расширения в TCRC. Таким образом, нет необходимости в определении, какой именно символ был послан в продолжение символьного интервала.

### Алгоритм управления системой

Принцип работы системы SS/CDMA основан на требовании пользователя. Таким образом, полоса частот SS/CDMA и размещение трафика канала для схемно- или пакетно-переключаемых сервисов определяется запросом пользователя. Запросы на выделение каналов посылаются по каналам управления (доступ - в восходящей линии, персональный вызов – в нисходящей), в то время как информационные данные передаются по каналам трафика. Переключение по принципу предоставления по требованию предполагает динамическое распределение ресурсов переключения. Каждый модуль CDS формирует внутрисполосное переключение для маршрутизации трафика между лучами одной пары восходящей и нисходящей линий и полосами частот в нисходящей линии.

В системе используются  $q$  пар (в восходящей и нисходящей линиях) полос частот и такое же количество модулей CDS. Переключение между модулями или между диапазонами трафика производится по методу предоставления по требованию, согласно которому могут быть затребованы полосы частот и модуль CDS. (SU должен перестраиваться на выделенные полосы частот и использовать соответствующий модуль CDS для переключения их трафика).

Предоставляемое по требованию переключение производится также по эффективному методу интегрированных пакетно- и схемно-переключаемых сервисов. Предложенный метод базируется на подвижной границе и может быть описан таким образом: в заданном наборе из  $K$  ортогональных каналов трафика,  $K_c$  из  $K$  каналов должны быть присвоены для схемно-переключаемых вызовов, а  $K_p$  - для пакетно-переключаемых данных ( $K=K_c+K_p$ ). Любая неиспользуемая схема канального трафика может быть моментально предложена для пакетов. Каналы трафика, выделенные для пакетных сервисов, не предлагаются для схемных сервисов.

Пусть  $k_c$  будет количеством активных схемных вызовов, а  $k_p$  – количеством передач пакетов за данный отрезок времени; тогда правила предоставления канала трафика основываются на таких условиях:

$$k_c < K_c$$

$$k_c + k_p \leq K$$

Более того, интегрированные пакетно- и схемно-переключаемые сервисы представлены и в спутниковых линиях, и в модулях CDS.

При использовании метода подвижной границы условия предоставления должны быть справедливы как для каждого  $i$ -го восходящего луча, так и для каждого  $j$ -го нисходящего луча. Таким образом, не более, чем  $K_c$  схемных вызовов, могут быть направлены к любому из  $i$  восходящих лучей или к каждому из  $j$  нисходящих лучей. Поэтому общее количество схем и пакетов, передаваемых в  $i$ -м восходящем луче и  $j$ -м нисходящем луче, не может быть больше емкости луча  $K$ . Если данное условие не выполняется, то после прохождения любого нового схемного вызова, этот вызов будет заблокирован. Точно так же в случае, если второе условие не выполняется, то после прохождения нового пакета данных, пакет должен быть буферизован.

Алгоритм предоставления по требованию (Demand Assignment Algorithm) работает на основе «от кадра к кадру» и может быть описан следующим образом. Пока происходит прохождение схемного вызова или пакета данных, SU посылает запрос через канал доступа к бортовому CU. Бортовой CU собирает все запросы для схем и пакетов, которые принимаются в продолжение кадра, в виде матрицы. Затем для предоставления новых схемных вызовов и пакетов данных должен быть применен Алгоритм Предоставления Канального Трафика (A Traffic Channel Assignment (TCA)).

Предоставление для совокупности возможных каналов может быть завершено, если все условия выполнены. Информация о предоставлении может быть передана к SU через канал персонального вызова, при этом каждый SU будет передавать или принимать по предоставляемому каналу трафика (т.е. полосе частот и кодам), в то время как CU устанавливает соединение через предоставленный модуль CDS. Трафик каналов может быть зарезервирован для продолжения схемного вызова или пакета данных.

Number of users	$E_b/N_0$ (dB) at $10^{-6}$		
	FO-1	MO-1	SO-1
1	4.8	2.3	0.38
30	4.85	3.05	3.4
60	4.95	3.8	11.65

Таблица 4. Влияние загрузки системы (количества пользователей на 10МГц) на достижимую величину  $E_b/N_0$  при  $BER=10^{-6}$ .

Моделирование переключателя и прохождение

При его применении метод CDS позволяет легко достичь определенных преимуществ над NMS. Строеение CDS является неблокируемым, а сложность его оборудования прямо пропорциональна размерам переключателя.

Поэтому CDS не вносит интерференции в каналы трафика в продолжение процесса переключения.

Управление переключателем производится посредством алгоритма TSA, который представлен в [10]. Представленный алгоритм может быть как оптимальным, так и случайным.

Оптимальный алгоритм TSA минимизирует количество блокируемых вызовов за счет использования метода максимального потока, который в комплексе ограничен величиной  $O(N^3)$ . В расчете простого алгоритма TSA (случайного) предоставление переключения для новых запросных вызовов производится по случайному закону. Как было показано, случайный алгоритм TSA может достигнуть результатов, близких к характерным для оптимального алгоритма [10]. Сравнив эквивалентные проблемы предоставления в TMS, мы увидим, что любой данный временной слот не больший по размерам, чем одно предоставление, может быть направлен к любому входному или выходному порту (который соответствует согласованному двухстороннему графику).

Запросный вызов должен быть заблокирован, если не будет применимого временного слота, у которого входной и выходной порты не заняты, поскольку эти порты могут быть применены в разных временных слотах. Если желаемые порты имеются в распоряжении в различных временных слотах, то будет возможно перегруппировать продолжающиеся вызовы так, чтобы новый вызов был назначен. В этом смысле алгоритм случайного планирования в TSM реализует пропускную способность на 10 или 15 процентов ниже, чем оптимальный [11].

С другой стороны, поскольку запрашиваемое направление может быть сформировано путем парного объединения любых применимых кодов в желаемом источнике и на определенных портах, в CDS случайный и вычислительно несложный алгоритм TSA может обеспечить близкий к оптимальному результат [11].

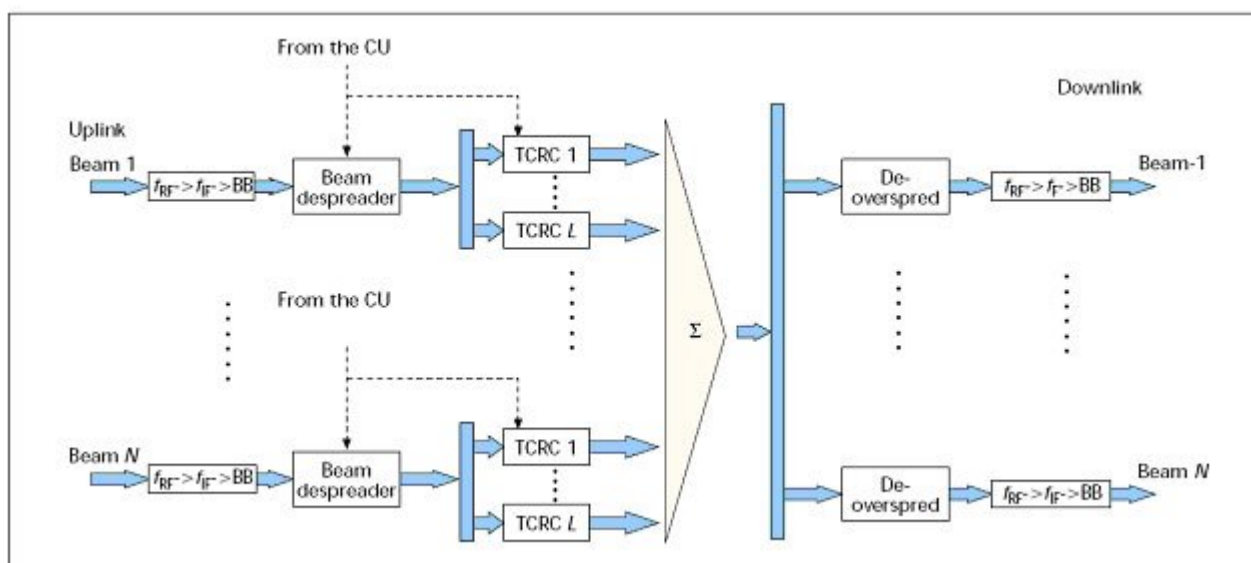


Рисунок 7. Архитектура CDS.

## Заключение

Предлагаемое построение системы SS/CDMA является тем инновационным проектом, который способен привлечь наше внимание к переключаемым и обладающим большой информационной емкостью ИСЗ, работающим при очень низком уровне мощности и обеспечивающим высококачественное обслуживание. Предложенные инновации относятся к улучшению использования частотного спектра, снижению массы и мощности бортового оборудования, повышению спектральной эффективности и получению очень низкого отношения сигнал/шум и малого коэффициента ошибок за счет использования метода доступа в линии SE-CDMA. Бортовой CDS и метод управления предоставлением по требованию позволяют достичь эффективного доступа и маршрутизации схемных и пакетных запросов в соответствии с требованием пользователя.

## Литература

- [1] T. Inukai, "An Efficient SS/TDMA Time-Slot Assignment Algorithm," IEEE Trans. Commun., vol. COM-27, Oct. 1979.
- [2] T. Scarcella and R.V. Abbott, "Orbital Efficiency Through Satellite Digital Switching" IEEE Commun. Mag., 1983.
- [3] L. C. Palmer and L. W. White, "Demand Assignment in the ACTS LBR System," IEEE Trans. Commun., vol. COM-38, May 1990.
- [4] E. Geraniotis and D. Gerakoulis "Bit Error Rate Evaluation of a Spectrally Efficient CDMA for Geostationary Satellite Communications," submitted to IEEE JSAC, May 1998.
- [5] G. T. Irvine and P. J. McLane, "Symbol-Aided Plus Decision-Directed Reception for PSK/TCM Modulation on Shadowed Mobile Satellite Fading Channels," IEEE JSAC, vol. 10, no. 8, Oct. 1992.
- [6] C. Berrou and A. Glavieux, "Near Optimum Error Correcting Coding and Decoding: Turbo Codes," IEEE Trans. Commun., vol. COM-4, no. 10, Oct. 1996.
- [7] S. Benedetto et al., "Serial concatenation of interleaved codes: Performance analysis design and interactive decoding," Telecopy and Data Acquisition Progress Report 42-126, Jet Propulsion Lab., Aug. 1996.

По материалам сайта [www.roks.com.ua](http://www.roks.com.ua)