

Архитектура и основные функции протоколов сети UMTS

Физические каналы сети UTRAN

Общая характеристика физических каналов. Физические каналы в сети UMTS используются для взаимодействия между абонентским терминалом и базовой станцией по радиointерфейсу Uu (см. раздел 6.1). «Идеологически» физические каналы отделены от верхних уровней UMTS, что позволяет рассматривать среду радиодоступа в качестве независимого нижнего уровня взаимодействия подсистем. Каждый физический канал имеет свой расширяющий код, позволяющий различать его среди других каналов.

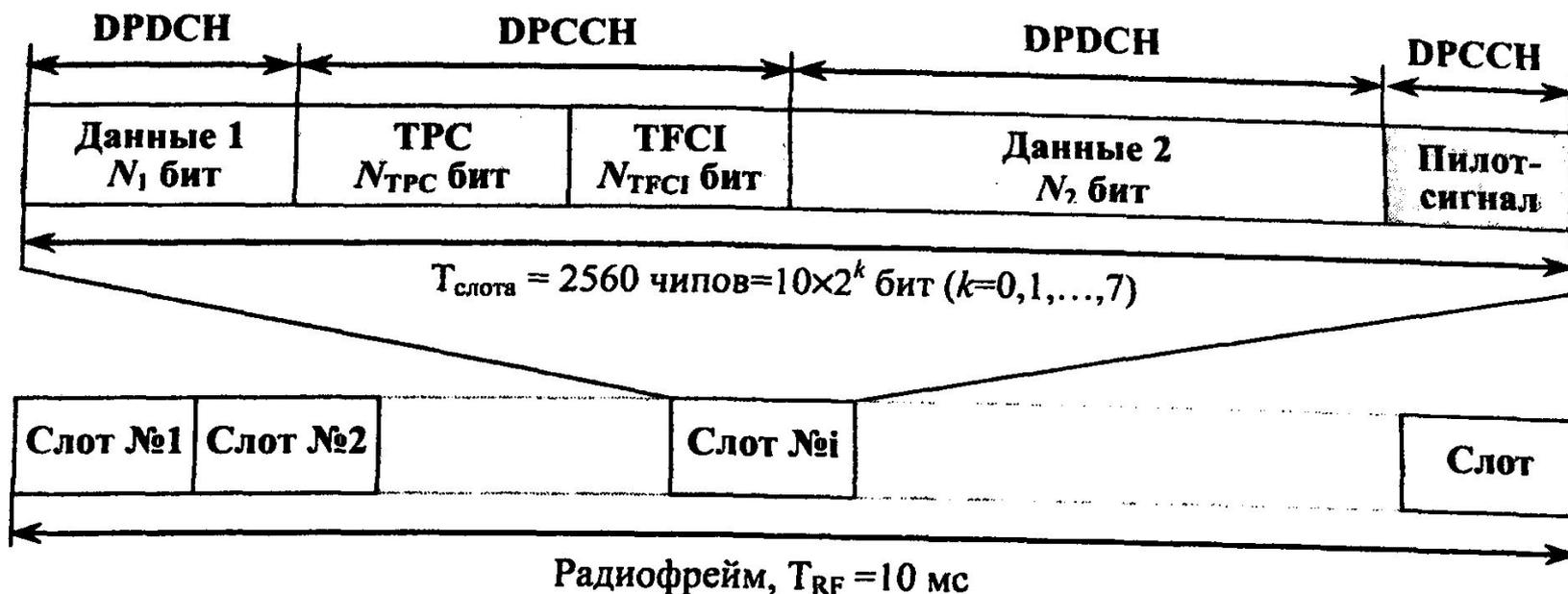
Различают два типа физических каналов: общие и выделенные. Если первые доступны многим абонентским терминалам в пределах обслуживаемой соты, то вторые используются только одним терминалом. По общим физическим каналам передаются пилот-сигналы, принимаемые всеми абонентскими терминалами соты, вызовы и другая управляющая информация. По выделенному каналу передаются данные пользователей, команды управления мощностью передатчика и диаграммой направленности антенны, а также сведения о скорости передачи.

В радиointерфейсе UTRA определены два типа выделенных физических каналов: выделенный физический канал данных DPDCH и выделенный физический канал управления DPCCCH. Первый служит для передачи данных с использованием логического транспортного канала DCH, причем на каждое соединение приходится один или несколько каналов DPDCH. Другой, DPCCCH, применяется для передачи управляющей информации. Несколько дополнительных каналов используются для обеспечения различных служебных функций. Полный перечень использующихся в режиме FDD (W-CDMA) физических каналов приведен в табл. 6.3.

Перечень физических каналов UMTS в режиме FDD

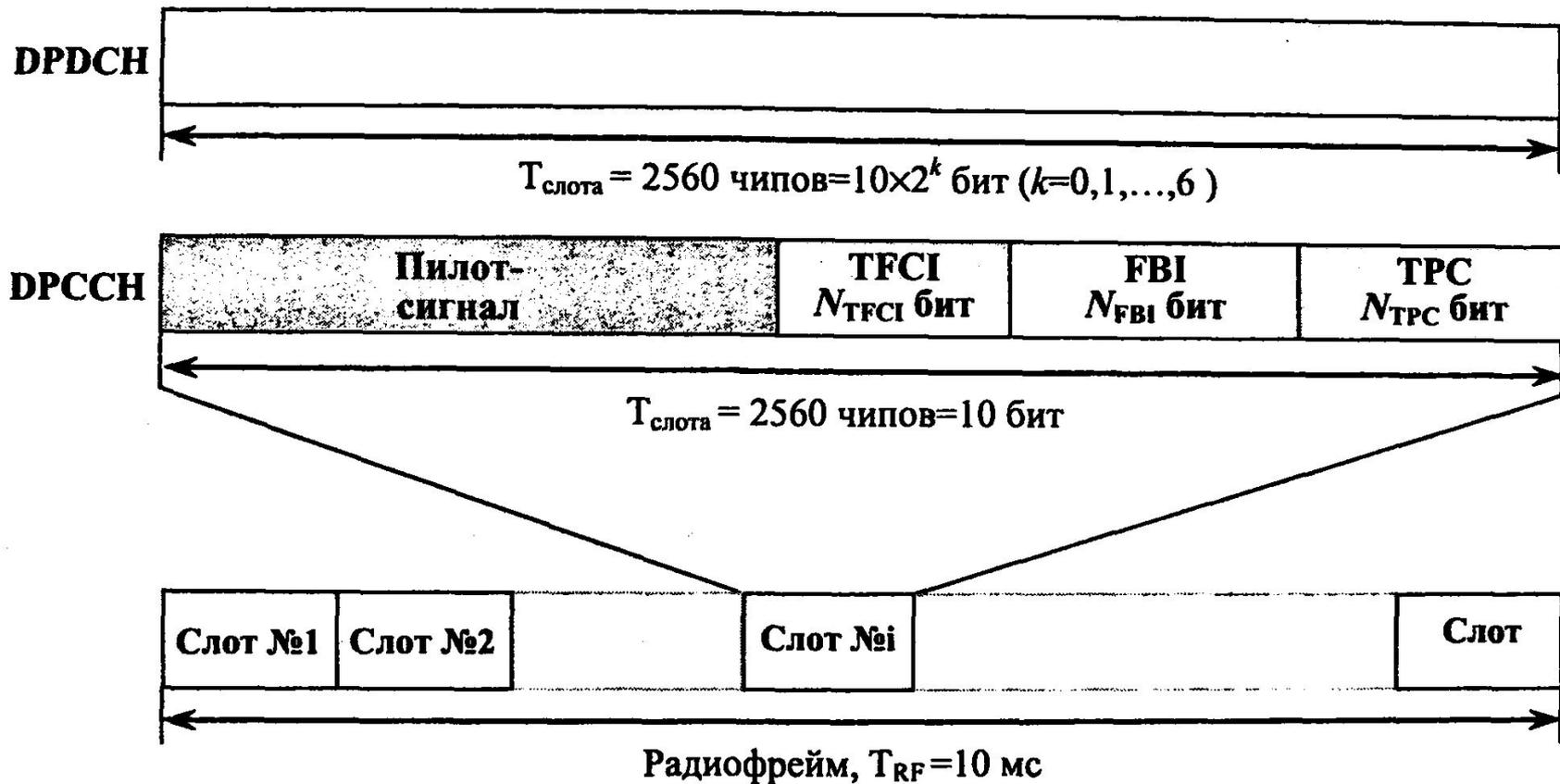
	Канал	Полное наименование канала
BC ← AC	PCPCH	Physical Common Packet Channel Физический пакетный канал общего назначения
BC ← AC	PRACH	Physical Random Access Channel Физический канал произвольного доступа
BC ↔ AC	AICH	Acquisition Indicator Channel Канал индикации захвата
BC ↔ AC	P-SCH	Primary Synchronization Channel Первичный канал синхронизации
BC → AC	S-SCH	Secondary Synchronization Channel Вторичный канал синхронизации
BC → AC	P-CCPCH	Primary Common Control Physical Channel Первичный канал управления общего назначения

BC → AC	S-CCPCH	Secondary Common Control Physical Channel Вторичный канал управления общего назначения
BC → AC	DPDCH	Dedicated Physical Data Channel Выделенный физический канал передачи данных
BC → AC	DPCCH	Dedicated Physical Control Channel Выделенный физический канал управления
BC → AC	PDSCH	Physical Downlink Shared Channel Физический разделяемый канал линии «вниз»
BC → AC	CSICH	CPCH Status Indicator Channel Канал отображения состояния транспортного канала CPCH
BC → AC	CPICH	Common Pilot Channel Пилотный канал общего назначения
BC → AC	PICH	Paging Indicator Channel Канал пейджинга и индикации
BC → AC	CD/CA-ICH	Collision-Detection/Channel-Assignment Indicator Channel (CD/CA-ICH) Канал обнаружения конфликта/индикации захвата (канала)
BC → AC	AP-AICH	Access Preamble Acquisition Indicator Channel Канал индикации захвата преамбулы доступа



Структура фрейма DPDCH/DPSSCH линия вниз

коэффициент расширения спектра (Spreading Factor) $SF=512/2^k (4\dots512)$;
 TPC – команды управления мощностью;
 TFCI – индикатор транспортного формата



Структура фрейма DPDCH/DPSSCH линия вверх

для DPDCH $SF=256/2^k$ (4...256);

для DPSSCH $SF=256=\text{const}$ (слот всегда содержит 10 бит)

TRC – команды управления мощностью;

TFCI – индикатор транспортного формата;

FBI – данные переспроса

Распределение данных между слотами и в пределах слота варьируется в зависимости от типа физического канала и текущей скорости передачи данных. Так, для восходящего канала DPSSN определены шесть типов структур, где различаются варианты с 0, 1 или 2 битами в полях FBI и в TFCSI. Пилотные биты и биты TPC присутствуют всегда, и их число изменяется таким образом, чтобы слот DPSSN был заполненным. Количество битов в каждом поле фрейма может быть различным: 2...6 бит пилот-сигнала, 0... 16 бит индикатора TFCSI и 0...248 или 2...2000 бит в поле данных.

Выделенные физические каналы. Основным предназначением выделенного канала данных DPDSN является передача пользовательского трафика. Имея переменный размер, DPDSN позволяет поддерживать несколько вызовов одновременно. Выделенные физические каналы для каждого соединения назначаются парами: один канал для передачи информации управления, другой – для целевого трафика. По линии «вниз» канал DPDSN может от фрейма к фрейму разделяться между несколькими пользователями. Он приспособлен для работы в условиях пиковой нагрузки, когда в одном (обычно нисходящем) направлении группе абонентов передаются большие потоки данных (например, web-страницы). Однако, если данные по DPDSN не передаются (что может иметь место в нисходящем направлении), то за счет временного уплотнения DPDSN приобретает «пульсирующий» характер, что приводит к ухудшению условий электромагнитной совместимости с соседними каналами [15]. В линии «вверх» подобная проблема не возникает.

Выделенный канал управления DPCCN служит для передачи пилот-сигналов, «опорных» символов для оценивания характеристик канала, команд управления мощностью TPC (Transmit Power Control) и указателя транспортного формата TFI (Transport Format Indicator). Последний предназначен для оповещения приемника о текущем состоянии и параметрах транспортных каналов, передаваемых по DPDCH. При передаче данных в линии вверх DPCCN используется совместно с каналом данных DPDCH за счет уплотнения по времени и мультиплексирования методом QPSK. На выходе квадратурного модулятора фактически создается один канал, по которому передаются два потока информации (каждый имеет свой скремблинг-код). В демодуляторе данные вновь расщепляются на каналы DPDCH и DPCCN.

В одном физическом канале DPDCH могут мультиплексироваться несколько низкоскоростных потоков данных. При организации высокоскоростного соединения в соте может возникнуть проблема нехватки каналообразующих кодов. В подобных случаях для передачи данных могут задействоваться общие каналы или вводиться добавочный код. Использование общих каналов считается более удачным способом повышения емкости соты, т.к. расширение множества кодов добавлением новых кодов приводит к утрате ортогональности между ними.

Общие физические каналы. По нисходящей линии организуется два типа общих каналов: первичные и вторичные. Первые используются для передачи широковещательной информации с фиксированной скоростью и коэффициентом расширения спектра (это канал ВСН). Вторые (вторичные транспортные каналы) используются для передачи сигналов вызова и служебных сигналов.

- В первичном общем канале управления Р-ССРСН передаются в нисходящем направлении данные транспортного канала ВСН. Этот канал за счет использования фиксированного каналообразующего кода доступен всем абонентским терминалам, находящимся в зоне покрытия. В каждом слоте передаются 8 бит пилот-сигнала и 12 бит данных (блоки ТРС и ТFI отсутствуют). Коэффициент расширения спектра в канале Р-ССРСН имеет постоянную величину (256), а скорость передачи данных невелика: 30 Кбит/с.

- На вторичный общий канал управления S-CCPCH отображаются сразу два транспортных канала: канал поискового вызова PCH и канал прямого доступа FACH. Они могут работать с единым каналом управления или же с отдельными физическими каналами управления S-CCPCH. Таким образом, в соте всегда имеется не менее одного физического канала S-CCPCH. В отличие от первичного канала, скорость передачи и протяженность слотов во вторичном канале может изменяться. Скорость передачи данных в канале S-CCPCH невелика по тем же причинам, что и в P-CCPCH. На последующих этапах развития системы она может быть увеличена за счет изменения некоторых параметров сети.
- Канал синхронизации SCH обеспечивает процедуру поиска соты абонентом, находящимся в зоне покрытия этой соты. Фактически он состоит из двух каналов: первичного канала синхронизации P-SCH и вторичного канала S-SCH. В первичном канале P-SCH используется фиксированный одинаковый для всех сот синхрокод с коэффициентом расширения 256. Сигналы P-SCH обеспечивают синхронизацию кадра в абонентском терминале, определяя принадлежность кода синхронизации к некоторой группе кодов.

- Общему пилотному каналу CPICH присваивается фиксированная для данной соты кодовая последовательность, роль которой по аналогии с терминологией GSM можно определить как «обучающую». В соте могут быть задействованы несколько каналов CPICH, которые подразделяются на первичные и вторичные. Вторичный канал может быть организован в соте с узконаправленной антенной, предназначенной для целевого обслуживания «горячих» точек с высоким трафиком. С системной точки зрения регулировкой мощности канала CPICH достигается баланс в распределении абонентской нагрузки между сотами: терминал всегда выбирает соту с наиболее выгодной энергетикой сигнала на входе приемника, в результате чего использование соты за счет снижения уровня мощности канала CPICH становится менее выгодным по энергетическим соображениям.
- Канал случайного доступа PRACH используется для реализации процедуры случайного доступа абонентского терминала в сеть

Кроме названных выше, в UMTS имеются и другие физические каналы (см. табл. 6.3). Особую роль выполняет группа каналов, которые можно было бы назвать «каналами индикации»:

- каналы индикации обнаружения конфликта в транспортном канале CPCH (CD/CA-ICH) для передачи абонентским станциям информации о использовании одинаковых групп идентификаторов двумя терминалами;
- канал индикации присвоения транспортного канала CPCH (CA-ICH);
- формируемый за счет свободных слотов в AICH канал CSICH, который оповещает абонентские терминалы о наличии транспортного канала CPCH, а также отображает состояние и конфигурацию последнего;
- канал CDICH (индикации обнаружения конфликта) и канал CAICH (индикации захвата), используемые для исключения конфликтов при использовании одинаковых групп идентификации двумя абонентскими терминалами.

Принципы канального кодирования в UTRAN

Каналообразующие и скремблирующие коды в UTRAN. Для обеспечения идентификации физических каналов разных пользователей каждому абонентскому терминалу в технологии WCDMA выделяется уникальный канальный код. В случаях, когда для увеличения скорости передачи БС передает АС сообщение по нескольким каналам сразу, желательно использовать ортогональные между собой каналообразующие коды.

Возможность адаптации системы UMTS к различным потребностям абонентов в скоростях передачи данных обеспечивается кодированием *каналообразующими* кодами (channelization codes) с переменным коэффициентом расширения спектра – Orthogonal Variable Spreading Factor (OVSF) [14]. Особенностью схемы кодирования, реализованной в WCDMA, является возможность варьирования коэффициента расширения спектра через каждые 10 мс (от фрейма к фрейму) путем «скольжения» по дереву кодов влево/вправо (см. п. 2.5.2.5.). Это обеспечивает значительную гибкость в организации физических каналов. Ортогональность сигналов разных пользователей соблюдается в пределах соты, в то время как взаимные корреляции сигналов разных сот имеют случайный характер.

Гибкость в развертывании и эксплуатации сети UMTS обеспечивается схемой т.н. двухуровневого канального кодирования, путем последовательного выполнения двух операций. Сначала передаваемый информационный символ каждого абонента перемножается с «коротким» расширяющим кодом (например, последовательностью Уолша), который ортогонален коду любого другого пользователя той же соты. Затем этот же сигнал перемножается с фрагментом псевдослучайной последовательности, специфичной для соты (для данной БС) в прямом канале (и уникальной для каждого абонента в обратном канале). Эти коды, используемые для идентификации базовых станций (соты, сектора) называют *кодами скремблирования*, или *скремблинг-кодами* (scrambling codes). В качестве таковых в UMTS применяются последовательности Голда длиной 2^{41} . Эти последовательности усекаются, формируя цикл длиной по 2^{16} бит (фрейм 10 мс). В UMTS используется асинхронная схема организации сотовой сети (глава 2), которая не требует синхронизации между базовыми станциями сети. Это повышает возможность быстрого развертывания и гибкого планирования как на местности, так и внутри помещений. В то же время, это же обстоятельство приводит к усложнению процедуры кодовой синхронизации и поиска соты.

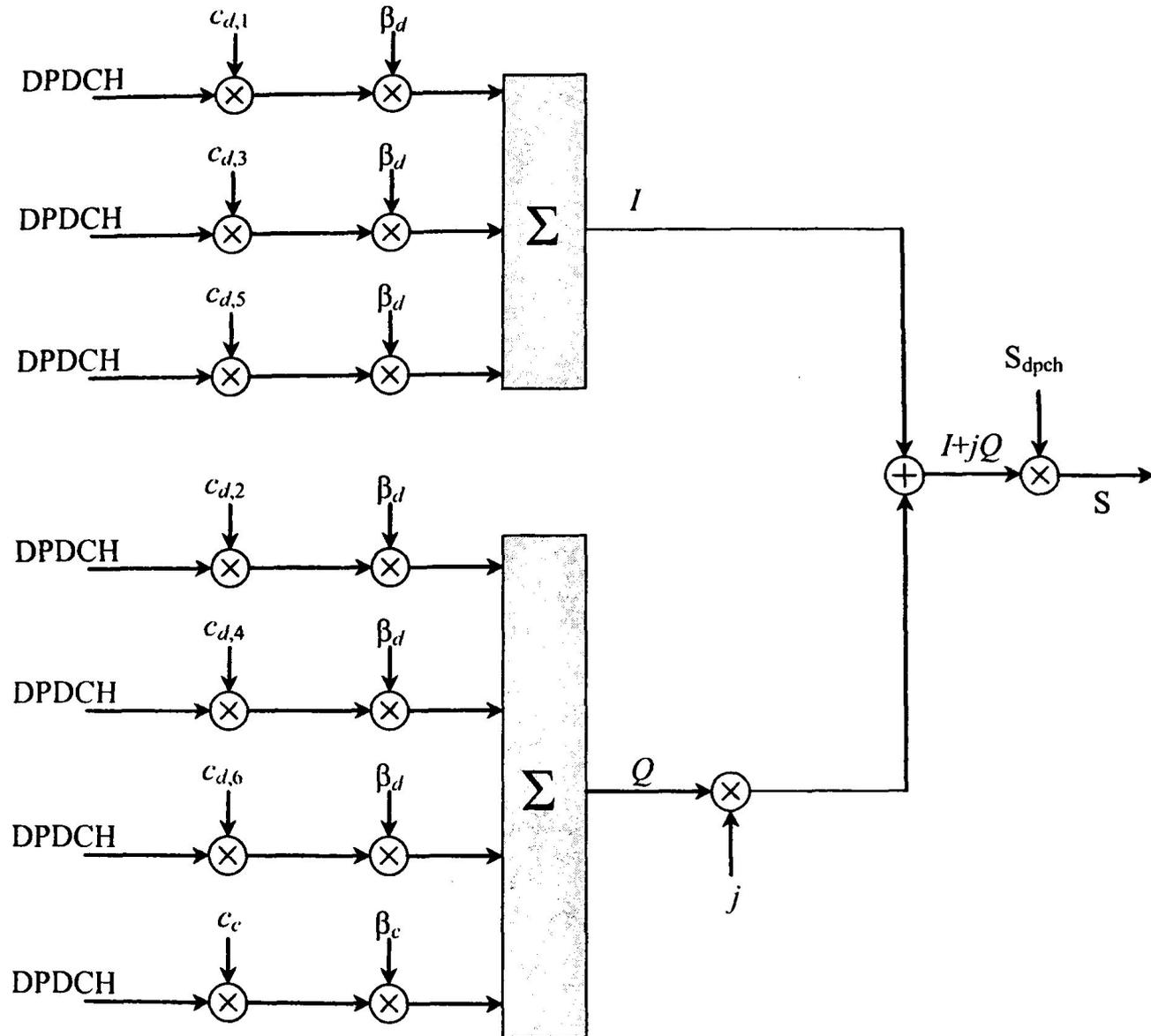
Канальное кодирование в восходящем направлении

- **Каналообразующее кодирование для линии «вверх».** Для передачи данных каждая АС может использовать несколько выделенных каналов DPDCH. Поэтому необходимы меры, гарантирующие их разделяемость в приемнике БС. Выделенный канал управления DPSSCH формируется из одной кодовой последовательности длиной $N=256$, состоящей из «единиц». В то же время каналы данных DPDCH могут формироваться на основе кодов различной длины в соответствии с реализованным в UTRAN механизмом динамического управления скоростью передачи. Временная протяженность элемента кода (чипа) имеет фиксированную величину, так что изменение скорости передачи приводит к изменению длительности информационного бита с пропорциональным изменением коэффициента расширения спектра.

Поскольку сигналы, передаваемые АС, привязаны к единой временной шкале, задаваемой ее стандартом частоты, разделение каналов реализуется на основе каналообразующих ортогональных кодов. Если пользователь задействует только один канал данных DPDCH, он может варьировать коэффициент расширения спектра в пределах от 256 до 4. При этом скорость передачи соответственно изменяется в пределах от $(3.84/4) \times 10^6$ до $(3.84/256) \times 10^6$, т.е. от 960 до 15 кбит/с (см. табл. 6.4). Минимальное расширение спектра ($N=SF=4$) соответствует максимальной скорости передачи. При недостаточности этой скорости АС может использовать до 6 DPDCH с одинаковым коэффициентом расширения спектра «параллельно».

Идентификатором выделенного физического канала является его уникальный каналообразующий код. На рис. 6.13 символом $c_{d,i}$ обозначается код, формирующий i -й выделенный канал данных, а символом c_c – код, формирующий канал управления. Каналы данных и каналы управления мультиплексируются перед поступлением в модулятор. Для этого битовые потоки перемножаются с весовыми коэффициентами регулировки мощности $\beta_{d,i}$ (для DPDCH) и β_c (для DPCCCH), а затем распределяются между ветвями модулятора. Эта процедура позволяет обеспечить разный уровень мощности в каналах данных и управления, удовлетворяя разным требованиям к качеству приема сообщения и служебной информации. Наибольший коэффициент β равняется единице, а промежуточные значения изменяются от 0 до 1, с шагом 1/15. Изменение весовых коэффициентов может происходить с каждым новым фреймом.

Мультиплексирование выделенных каналов в Uplink



- **Скремблирующее кодирование для линии «вверх».** Завершающим шагом в процедуре расширения спектра и реализации кодового разделения в восходящем направлении является скремблирование, которое представляет собой перемножение мультиплексированного сигнала со скремблирующим кодом, выполняющим роль идентификатора АС. Повторяясь с каждым фреймом протяженностью 10 мс, эти коды предназначены для разделения сигналов АС приемником БС, так что критерием для их отбора является малый уровень взаимной корреляции.

Зависимость скорости передачи данных по радиointерфейсу UMTS
от коэффициента расширения спектра сигналов

Коэффициент расширения спектра	Скорость передачи, символов/с $\times 10^3$	Скорость передачи линия «вниз», кбит/с	Скорость передачи линия «вверх», кбит/с
4	960	1920	960
8	480	960	480
16	240	480	240
32	120	240	120
64	60	120	60
128	30	60	30
256	15	30	15
512*	7.5*	15	–

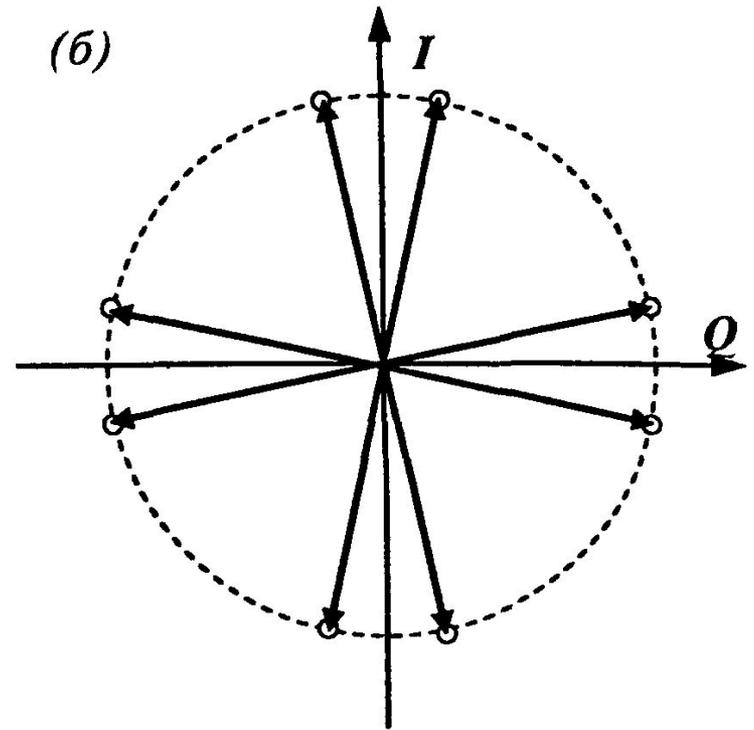
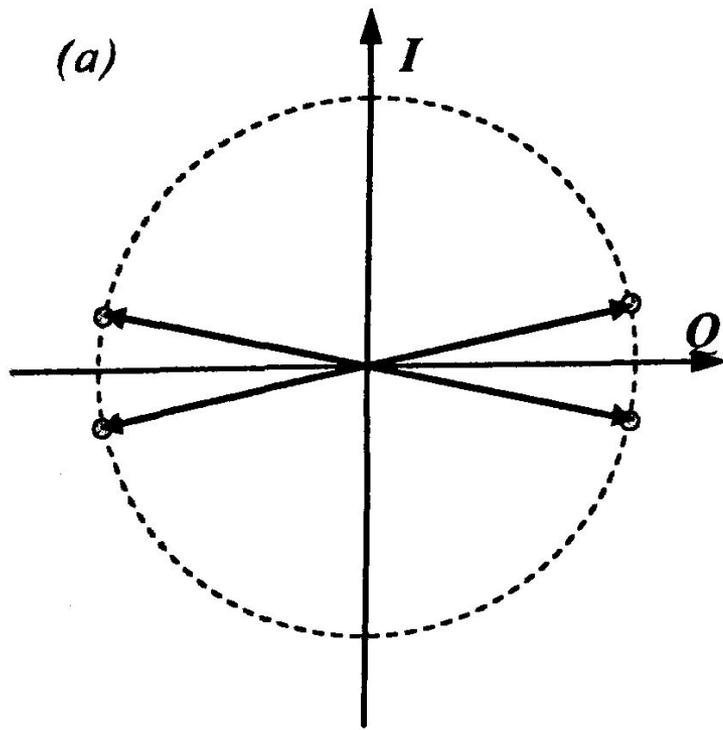
* Только в нисходящем направлении.

Применение длинных кодов предусмотрено при использовании обычного для CDMA RAKE-приема. Роль скремблирующих кодов при этом выполняют сегменты усеченной до 38400 чипов (длительность фрейма) последовательности Голда периода $L=2^{25}-1$. Формирование последовательностей Голда осуществляется суммированием по модулю два циклических сдвигов двух M -последовательностей длиной $L=2^{25}-1$, образующих т.н. предпочтительную пару (см. главу 2). Их порождающие полиномы, согласно [16]: $f_1(x) = x^{25} + x^3 + 1$, $f_2(x) = x^{25} + x^3 + x^2 + x + 1$. Ввиду усечения длины последовательностей Голда оптимальность периодических корреляционных свойств этих кодов утрачивается. Поэтому единственным основанием для их использования, по-видимому, является простота формирования большого количества различных последовательностей ($2^{25}+1$).

Скремблирующий код засинхронизирован с началом фрейма АС, совпадающим по времени с первым чипом периодически повторяемой последовательности Голда. Для выравнивания мощности в квадратурных каналах модулятора она из двоичной преобразуется в четырехфазную. Необходимость этой процедуры объясняется тем, что квадратурное мультиплексирование каналов данных и управления производится с предварительным взвешиванием (рис. 6.13), вследствие чего мощности компонентов в мультиплексированном сигнале могут многократно отличаться [15].

Комплексный (четырёхфазный) скремблирующий код формируется из двух составных частей. Первая, «действительная» часть, представляет собой ни что иное, как усеченный до длины $N=38400$ начальный фрагмент последовательности Голда. Вторая, «мнимая», образуется путем сдвига той же последовательности Голда на $16\ 777\ 232$ чипа, затем ее усечения до необходимой длины ($N=38400$), замены нечетных символов на инверсии предшествующих им четных и, наконец, поэлементного перемножения полученного результата с действительной частью.

Целью такого явного усложнения процедуры построения скремблирующего кода было облегчение энергетического режима передатчика. В итоге формируемый сигнал оказывается аналогом модулированного (на уровне чипов) OQPSK-сигнала (offset QPSK), а не обычного QPSK. Достигаемое при этом преимущество состоит в отсутствии одновременных изменений знаков действительной и мнимой компонент при переходе от четных позиций к нечетным [15]. Нетрудно убедиться, что смена любого текущего сигнального вектора на последующий может происходить только путем поворотов на угол $\pm 90^\circ$.



Эффект балансировки мощностей квадратур при комплексном (четырёхфазном) скремблировании [15]

Кодовые последовательности коротких кодов C_s могут быть представлены в виде комплексной последовательности $C_s = C_I + jC_Q$, где C_I и C_Q – расширенные коды Касами, каждый длиной 256 символов. Короткий код может быть изменен в течение сеанса связи, хотя подобное может происходить лишь в исключительных ситуациях. Использование коротких кодов требует специального кодового планирования сети.

Роль скремблирующих кодов состоит не только в разделении между собой сигналов различных АС, но и в «отделении» каналов общего пользования (таких, как PRACH и PCPCH) от выделенных каналов (DPDCH, DPSSCH).

В линии «вверх» одновременно передается один выделенный физический канал управления DPSSCH и до шести параллельных выделенных каналов DPDCH. Действительные расширенные символы нормируются путем взвешивания амплитуд с коэффициентом β_c для DPSSCH и с коэффициентом β_d для всех каналов DPDCH. После нормировки по мощности поток действительных посылок чипов синфазной (I) и квадратурной (Q) составляющих суммируется и преобразуется в комплексный поток. Затем сформированный комплексный сигнал скремблируется комплексным скремблирующим кодом C_s . При формировании физического канала случайного доступа PRACH процедуры кодирования и модуляции в основном аналогичны.

- **Особенности каналообразующего кодирования для линии «вниз».** Для разделения общих физических каналов с выделенными каналами, а также друг с другом применяют ортогональные каналообразующие коды OVSF.

Если базовая станция для связи с некоторой АС использует один выделенный канал данных, этот канал наряду с выделенным каналом управления определяется соответствующим каналообразующим кодом. Если же в целях увеличения скорости передачи информации БС передает данной АС сообщение по нескольким каналам одновременно, то командная составляющая DPDSN передается лишь по одному из параллельно занятых физических каналов. При этом скорость передачи по DPDSN и, соответственно, расширение спектра во всех этих каналах одинаковы. В каналах с разными скоростями используют коды с разным значением коэффициента расширения. Диапазон возможных значений коэффициента расширения спектра в линии «вниз» – от 4 до 512.

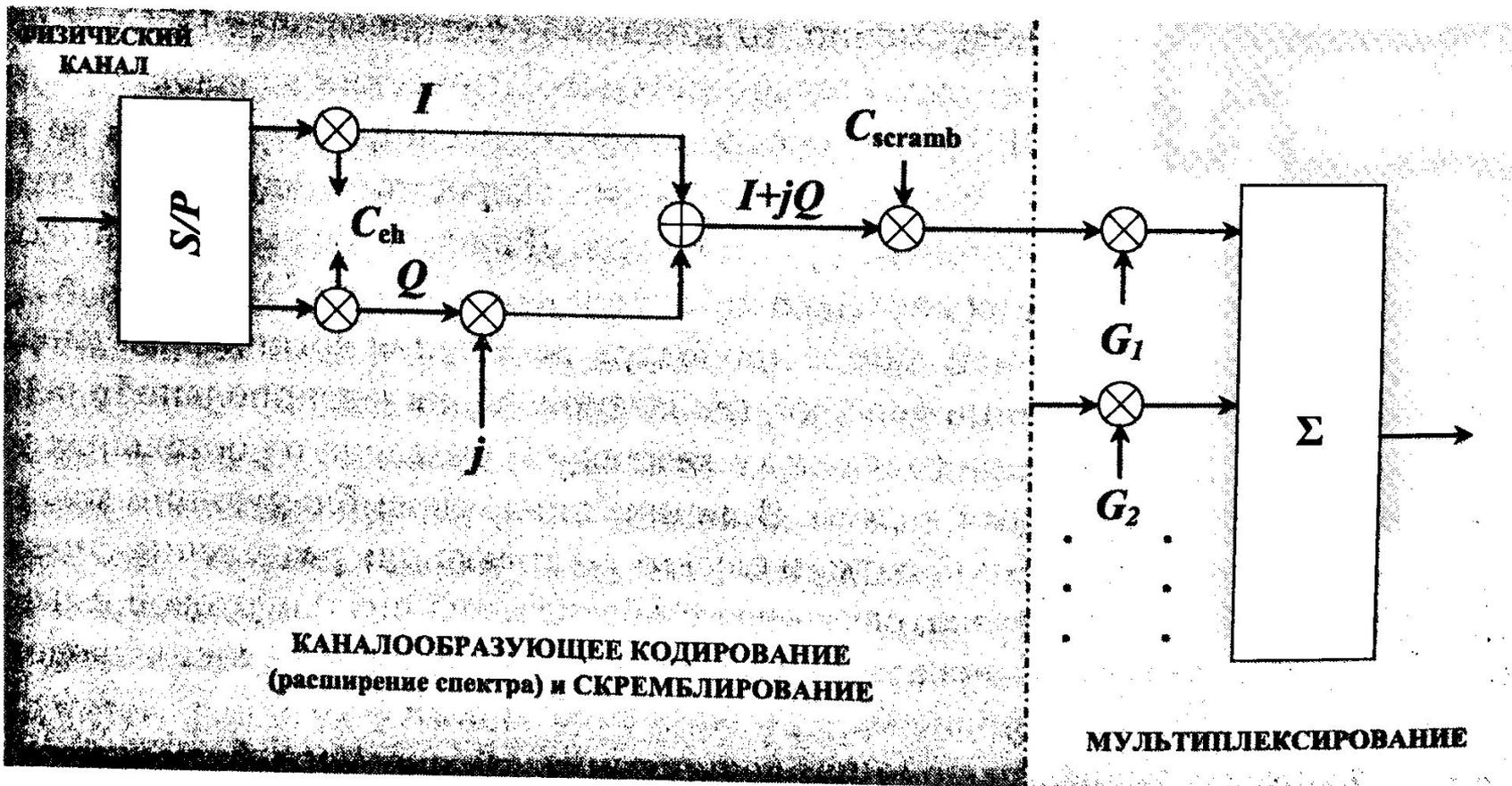
В целом, в нисходящей линии процедура выделения физическим каналам кодов сложнее, чем в линии «вверх», где каждой АС на «монопольной» основе выделено все дерево кодов (поскольку каждая АС отделена от остальных уникальным скремблирующим кодом). В линии "вниз" скремблирующий код один и тот же для всех АС данной соты, и служит он только для разделения сигналов различных БС. Вся нагрузка, связанная с обеспечения внутрисотовой емкости, полностью ложится на каналообразующие коды, а задача управления кодовым ресурсом решается на уровне координации работы всей сети.

Различия в битовой скорости в нисходящем и восходящем направлениях при одном и том же коэффициенте расширения спектра обусловлены применением разных схем модуляции. Символ, передаваемый по линии «вверх», содержит один бит информации, а по линии «вниз» – 2, за счет квадратурной фазовой модуляции (QPSK). При этом пары битов входного потока данных отображаются в один символ, передаваемый в квадратурных I- и Q-каналах.

Канальное кодирование включает процедуру «комплексного» расширения спектра информационного символа каналобразующим кодом C_{ch} (осуществляемую в квадратурных ветвях QPSK-модулятора) и затем скремблирование (кодом C_{scramb}). Принцип модуляции и расширения спектра в каналах DPDCH и DPCCH аналогичен.

При использовании в АС одного канала данных его объединение с каналом управления осуществляется в обычном квадратурном модуляторе. Каналу DPDCH отводится синфазная (I), а DPCCH-квадратурная (Q) ветвь модулятора.

Для широковещательного транспортного канала ВССН каналобразующие коды выбираются одинаковыми во всех сотах сети и не изменяются в процессе сеанса связи. В других случаях каналобразующий код может меняться, к примеру, в процессе хэндовера.



Принцип канального кодирования и мультиплексирования
в нисходящем канале UMTS [13]

- **Особенности скремблирующего кодирования в нисходящем канале.** Скремблирующие коды в линии «вниз» используются для разделения сигналов различных базовых станций или секторов. Эти коды формируются на основе тех же последовательностей Голда, полученных на основе M-последовательностей одинаковой длины, описываемых полиномами:

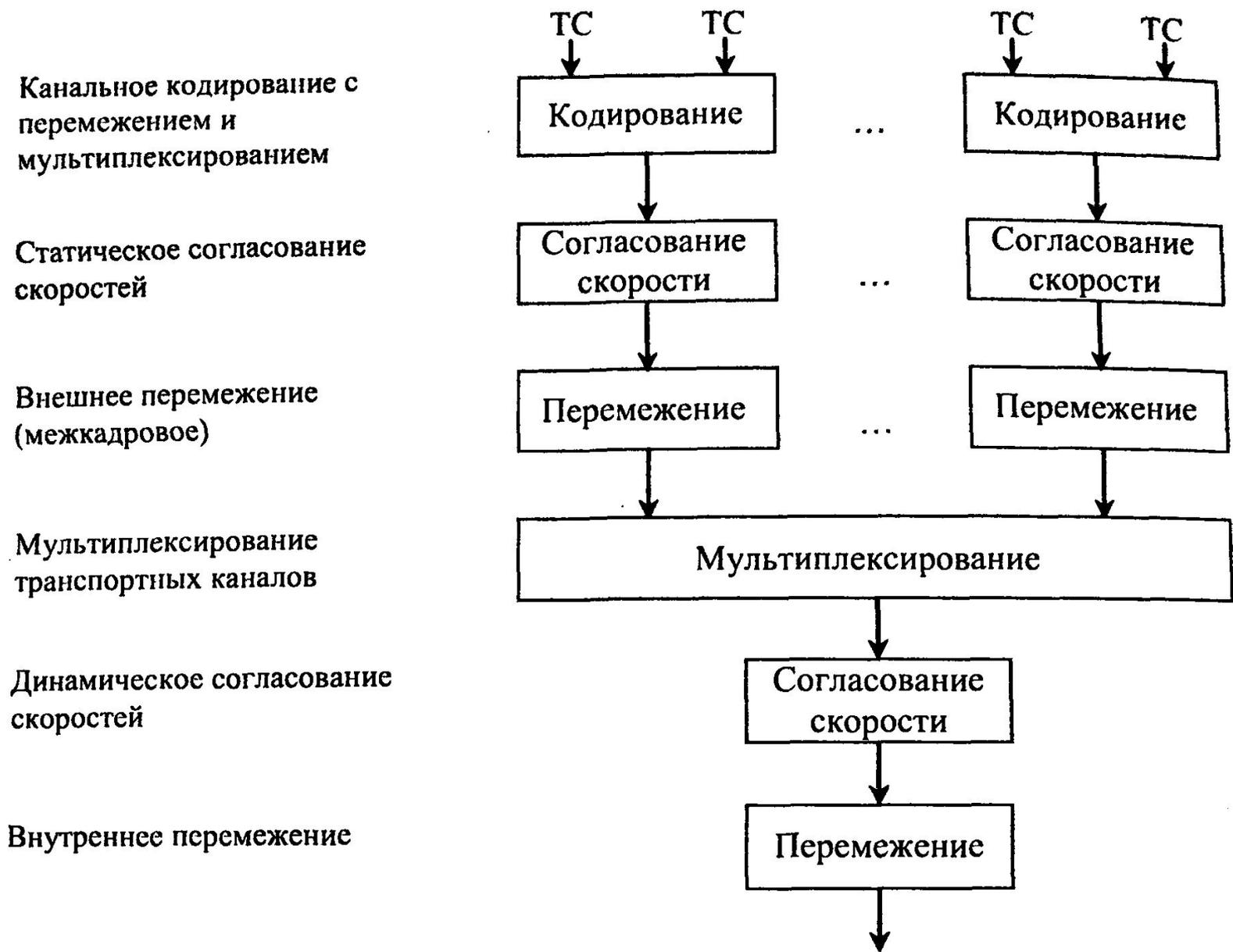
$$f_1(x) = x^{18} + x^7 + 1, \quad f_2(x) = x^{18} + x^{10} + x^7 + x^5 + 1.$$

Поэлементное суммирование по модулю 2 указанной пары последовательностей с взаимным сдвигом приводит к формированию одной из последовательностей Голда длины $L=2^{18}-1=262143$. Хотя общее число последовательностей Голда составляет при этом $L=2^{18}+1=262145$, из них используются лишь $2^{13}=8192$. Из разрешенных последовательностей вырезают два сегмента длины 38 400: начальный и сдвинутый относительно первого на $2^{17}=131\,072$ чипа. Первый сегмент используется в качестве действительной, второй – мнимой части четырехфазного скремблирующего кода в модуляторе.

В целях обеспечения процедуры синхронизации (раздел 6.4) упомянутые выше 8192 последовательности разделены на 512 подмножеств. Каждое из них включает одну первичную и 15 вторичных последовательностей. В свою очередь, первичные последовательности разделены на 64 группы по 8 последовательностей в каждой. Каждой БС выделяется свой первичный код [16].

Мультиплексирование каналов в стандарте UMTS. Мультиплексирование – это отображение нескольких транспортных каналов в один физический канал. Эта процедура состоит из корректирующего кодирования, согласования скоростей разных потоков данных, межкадрового и внутрикадрового перемежения, а также, собственно мультиплексирования транспортных каналов (рис. 6.16).

Передача данных в нисходящем канале с высокой скоростью быстро приводит к исчерпанию каналовобразующих кодов под одним скремблинг-кодом. Существуют два варианта решения этой проблемы: использование дополнительных скремблинг-кодов и использование общих каналов.



Упрощенная блок-схема, поясняющая принципы кодирования и перемежения транспортных каналов в системе UMTS