

Второе дыхание второго поколения



Варукина Лидия, к.т.н., менеджер по оборудованию мобильного широкополосного доступа компании Nokia Siemens Networks

Успехи в цифровой технике, миниатюризация электронных компонентов позволили повысить производительность вычислительных средств не только традиционных компьютеров, но и телеком-оборудования. Сложные алгоритмы цифровой обработки сигналов, не реализуемые ранее из-за ограниченной производительности предыдущих процессорных платформ, стали реальностью сейчас и поддерживаются современными телефонами, не говоря об оборудовании базовых станций (с меньшими требованиями к компактности «железа»). Новые технические решения GSM в большой степени повторяют алгоритмы, заложенные в фундамент систем 3-го и 4-го поколений и определяющие их беспрецедентную производительность (MIMO, многопозиционная модуляция, координация помех между сотами), позволяют также в несколько раз повысить голосовую емкость сетей GSM.

Эволюция GSM

Основные вехи стандартизации GSM отражены на рис. 1. Первая спецификация GSM была выпущена Европейским Институтом Стандартизации в области Телекоммуникаций (ETSI) в 1990 г. Первая сеть запущена в Финляндии в 1992 г. И с той поры технология и сети непрерывно развивались от чисто голосового применения до пакетной передачи данных.

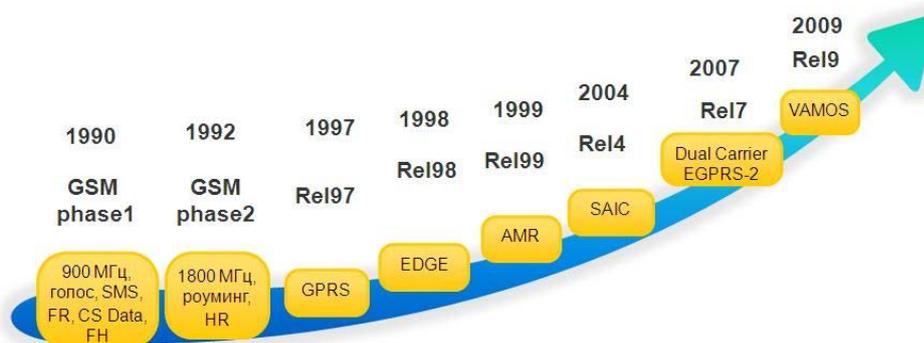


Рис. 1. Основные этапы стандартизации GSM

Большинству специалистов хорошо известны базовые функциональности, стандартизованные в 90-х и используемые на сетях до сих пор. Более поздние технические решения, появившиеся за последний десяток лет, были затенены от общего внимания появлением технологий 3G и 4G. Именно этим решениям посвящена данная статья, но для их полного понимания вкратце напомним базовые технические решения.

Базовые технические решения

В GSM применяется частотное и временное разделение каналов. В каждом кадре несущей GSM пользовательские данные мультиплексируются в восьми временных слотах. Голосовые соединения могут мультиплексироваться по одному или по два в один слот. Полноскоростные соединения (FR – Full Rate) упаковываются в слот по одному, полускоростные соединения (HR – Half Rate) – по два в слот, см. рис. 2.

Первые сети и терминалы работали с полноскоростными (FR) и полускоростными (HR) речевыми кодеками со скоростями 13 и 5,6 кбит/с, соответственно. При полускоростной передаче снижается качество речи, но можно вдвое увеличить емкость радиоканалов, а также повысить помехоустойчивость.

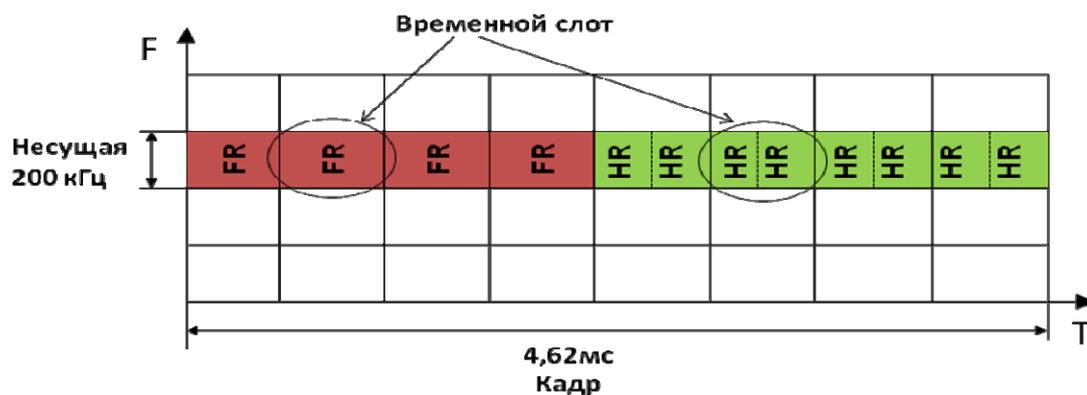


Рис. 2. Кадр несущей GSM

Позже был стандартизирован улучшенный полноскоростной кодек (EFR – Enhanced Full Rate) на базе более совершенного вокодера, скорость передачи речи – 12,2 кбит/с, помехоустойчивость при этом стала выше, а качество речи – сравнимое с качеством речи в проводных сетях. Затем появилась возможность использования адаптивных мультискоростных кодеков (AMR – Adaptive Multi Rate) с со скоростями от 4,75 до 12,2 кбит/с, которые могут использоваться для полноскоростных (AMR-FR) и полускоростных (AMR-HR) соединений. Скорость помехоустойчивого кодирования для каждого из кодеков указана в табл. 1.

Табл. 1. Характеристики речевых кодеков

Кодек	Скорость передачи речи, кбит/с	Алгоритм вокодера	Скорость помехоустойчивого кодирования	
			канал FR	канал HR
FR	13	RTE-LTP	0,57	-
HR	5.6	VCELP	-	0,49
EFR	12,2	ACELP	0,54	-
AMR	12,2	ACELP	0,54	-
	10,2	ACELP	0,45	-
	7,95	ACELP	0,35	0,7
	7,4	ACELP	0,32	0,65
	6,7	ACELP	0,29	0,59
	5,9	ACELP	0,26	0,52
	5,15	ACELP	0,23	0,45

	4,75	ACELP	0,21	0,42
--	------	-------	------	------

В зависимости от нагрузки и качества канала система может переключать скорость AMR-кодека и выбирать режим FR или HR. Соединения AMR-FR позволяют значительно повысить помехоустойчивость системы путем перехода к менее скоростным кодекам, с меньшей скоростью помехоустойчивого кодирования, значит, с большим числом проверочных бит в кадре. Переход от EFR к наиболее робастному AMR-кодеку 4,75 кбит/с позволяет повысить помехоустойчивость речевого соединения на 4-6 дБ, т.е. речевое соединение будет удерживаться даже при очень низком отношении сигнал-шум. Это позволяет либо значительно увеличить дальность связи, либо повысить степень переиспользования частот и, следовательно, емкость сети. А применение полускоростных AMR-соединений позволяет потенциально удвоить емкость сети. Конечно, помехоустойчивость и емкость сети повышается за счет некоторого снижения качества речевого сигнала, но в допустимых пределах [2].

AMR-кодеки были стандартизированы в 1999г., их массовое применение стало реальностью только во второй половине прошлого десятилетия. Задержка, как и для всех новых решений, требующих смены парка абонентского оборудования, связана с задержкой выхода на рынок и достаточного проникновения новых абонентских терминалов в сотовых сетях. Первые AMR-телефоны появились в 2001г., а их проникновение достигло критической массы (>50%) только после 2005г. Сейчас по разным оценкам проникновение GSM-телефонов с AMR-кодеками варьируется от 70% до 90%.

Наибольший эффект по емкости от применения AMR-кодеков проявляется не при классической кластерной схеме переиспользования частот, а в сети с прыжками по частоте (FH – Frequency Hopping) при псевдослучайной перестройке частот каналов по всей системной полосе и при малом коэффициенте переиспользования частот, который может быть уменьшен до 1 (рис. 3). В последнем случае емкость каждого сектора ограничивается не числом доступных временных слотов (числом приемопередатчиков в секторе), а уровнем помех в каждом канале (отношением сигнал/шум).

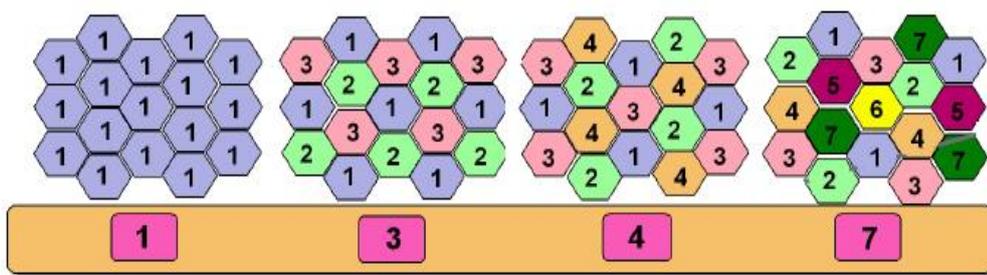


Рис. 3. Варианты частотных планов сети с коэффициентами переиспользования частот 1, 3, 4, 7

Для каналов ВССН, переносящих управляющую и системную информацию, для однозначной идентификации сот и ввиду высоких требований к надежности доставки этой информации может использоваться только кластерный план с коэффициентом переиспользования частот 12-15, гарантирующий высокое отношение сигнал/шум. Для каналов трафика ТСН может использоваться меньший коэффициент переиспользования: при кластерном плане – порядка 7 - 9, при прыжках по частоте эквивалентный коэффициент переиспользования частот может быть равен 1.

В настоящее время в сетях GSM для каналов TCH применяют оба варианта частотных планов. В нашей стране долгое время в силу особенностей частотной политики, когда каждая используемая в секторе частота несущей требовала согласования с регулирующими органами, прыжки по всей системной полосе были просто невозможны. Использовался (а на большинстве сетей и сейчас используется) частотный план с довольно высоким коэффициентом переиспользования частот и ограниченный вариант прыжков по частоте – прыжки по частотным каналам сектора. В последние годы частотная политика изменилась, псевдослучайная перестройка частот радиоканалов GSM была разрешена Государственной комиссией по радиочастотам [6, 7].

Среди прочих базовых технических решений GSM следует выделить два метода повышения спектральной эффективности: прерывистая передача – абонентская станция и базовая станция не излучают канал трафика в паузах речи; управление мощностью – мощность передатчика выбирается такой, чтобы обеспечить уровень сигнала на приеме, близкий к чувствительности. Обе функциональности, в первую очередь, снижают уровень помех в сети, а также позволяют уменьшить энергопотребление передатчиков, а для абонентских станций заметно увеличивают время работы аккумулятора без подзаряда.

Новые средства повышения емкости и спектральной эффективности GSM

Подавление соканальных помех

Очень эффективным способом повышения помехоустойчивости является разнесенный прием в комбинации с цифровой обработкой сигналов по методу оптимального весового сложения компонент (MRC – Maximum Ratio Combining) или подавления мешающих компонент (IRC – Interference Rejection Combining) [1]. Принцип работы обоих алгоритмов иллюстрируется рис. 4, в приемнике реализуется когерентный прием: по обучающим последовательностям (TSC – Training Sequence Code) полезного и мешающего каналов оцениваются характеристики распространения радиоволн, т.е. ослабления и задержки принятых сигналов. Оценки каналов распространения полезного и мешающего сигналов используются затем для вычисления весовых коэффициентов для последующей цифровой обработки. Принятые сигналы умножаются на соответствующие весовые коэффициенты (умножение сигнала на весовой коэффициент означает регулировку его амплитуды и фазы). В случае MRC весовые коэффициенты должны быть такими, чтобы обеспечить синфазное сложение полезных компонент сигнала, принятых двумя ветвями. В случае IRC весовые коэффициенты подбирают такими, чтобы компоненты мешающего сигнала, принятые двумя ветвями, скомпенсировали друг друга. Первая схема дает наилучшие результаты обработки в условиях гауссовского шума, а вторая – при наличии доминирующей соканальной помехи, например, в сети с малым коэффициентом переиспользования частот (выигрыш IRC по емкости в таких условиях составляет порядка 10% по сравнению с MRC) [1].

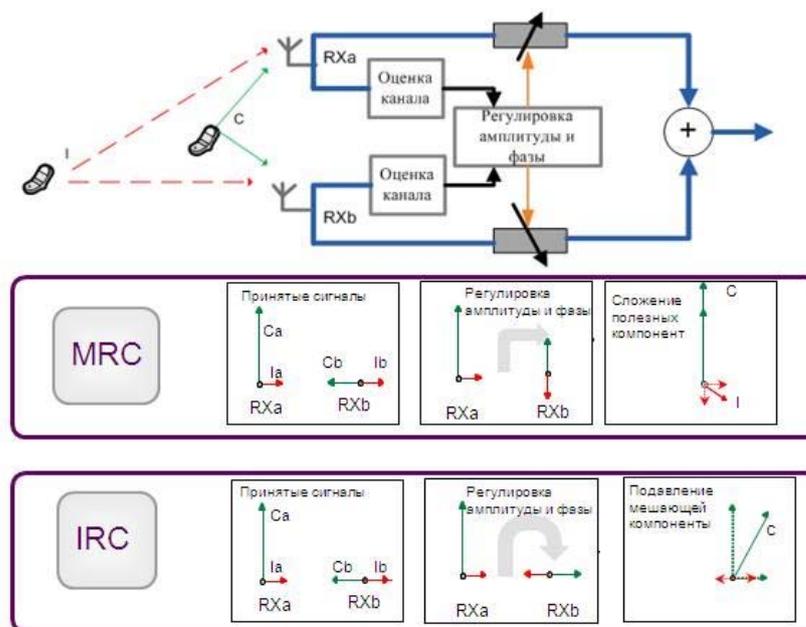


Рис. 4. Алгоритмы цифровой обработки сигналов при разнесенном приеме

Эти алгоритмы с легкостью реализуются в приемниках базовых станций, оснащенных, как минимум, двумя антеннами и парой приемных ветвей в каждом секторе. А на линии вниз реализация проблематична – в мобильном телефоне непросто разместить две антенны и две приемные ветви.

В 3GPP в 2002 начались работы по изучению и последующей стандартизации решений по подавлению соканальных помех в абонентских станциях с одной антенной (SAIC – Single Antenna Interference Cancellation). В 2005г. новый тип абонентских станций с поддержкой SAIC был включен 3GPP в спецификации GSM, Release 6. Спецификации задают требования к характеристикам таких абонентских станций, а также способ сигнализации об этой функциональности в сети GSM, но не определяют, каким образом эта функциональность должна реализовываться в оборудовании. Первые SAIC-терминалы появились еще до завершения стандартизации в 2004г.: сигнализация об этом функционале в сетях не поддерживалась, но терминалы могли работать с пониженным отношением сигнал/шум, благодаря петле управления мощностью на линии вниз каналы для таких терминалов излучались с меньшей мощностью, следовательно, меньше уровень помех для соседних сот – выше емкость сети. На данный момент, через 7 лет после стандартизации, проникновение SAIC-терминалов в сетях GSM в мире варьируется от 35% до 60%.

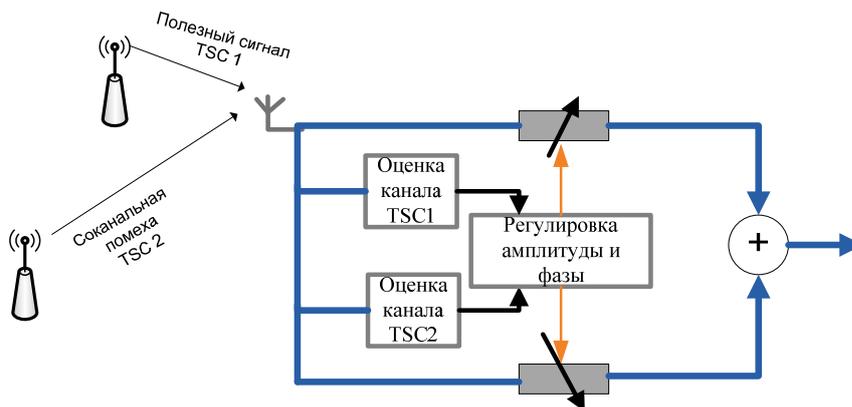


Рис. 5. Принцип обработки сигналов в приемнике SAIC

Пояснить принцип обработки сигнала в приемнике SAIC можно с помощью рис. 5. По обучающим последовательностям полезного сигнала (TSC1) и помехи (TSC2) оцениваются характеристики соответствующих каналов. Входной сигнал подается в две ветви, где по вычисленным оценкам осуществляется регулировка амплитуд и фаз двух копий сигнала так, чтобы подавить соканальную помеху (аналогично алгоритму IRC на рис. 4). Наилучшим образом эффект от применения SAIC заметен при наличии доминирующей соканальной помехи, в таких условиях абонентская станция может работать даже при отношении сигнал/помеха 0 дБ (т.е. даже когда уровень полезного сигнала равен уровню помехи).

Синхронная сеть радиодоступа

По стандарту в сетях GSM должна обеспечиваться частотная синхронизация, требования к фазовой синхронизации отсутствуют. Однако, если все базовые станции будут излучать синхронно все временные элементы сигнально-кодовых конструкций (кадры, слоты и т.п.), то подавление соканальных помех значительно упростится. В отсутствие фазовой синхронизации слоты полезного сигнала и соканальной помехи могут быть смещены относительно друг друга до 50%, см. рис. 6, при этом значительно возрастает вероятность ошибок при демодуляции обучающих последовательностей и оценивании каналов. При синхронизации подсистемы базовых станций можно получить выигрыш по емкости до 20%. Однако, для достижения фазовой синхронизации нужен единый высокоточный источник синхросигналов, например, спутниковая система позиционирования GPS или ГЛОНАСС, а базовые станции должны оснащаться приемниками GPS/ГЛОНАСС.



Рис. 6. Смещение слотов в асинхронной сети

Ортогональное уплотнение каналов

В 2007 г. в рамках 3GPP началось изучение методов уплотнения голосовых каналов - переноса нескольких каналов в одном слоте [3, 4]. Один из методов - ортогональное уплотнение

каналов (OSC – Orthogonal Subchannel). OSC предусматривает уплотнение двух голосовых каналов в один канал при применении на линии вниз многопозиционной фазовой модуляции, а на линии вверх - технологии многопользовательского MIMO (MU-MIMO – Multi-User Multiple-Input-Multiple-Output). Эта функциональность абсолютно прозрачна для абонентского оборудования при условии, что терминалы поддерживают алгоритм SAIC. Вся интеллектуальная составляющая концепции OSC реализуется в базовой станции. Концепция иллюстрируется рис. 7.

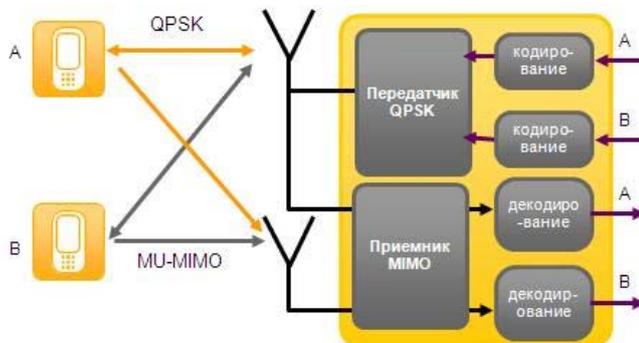


Рис. 7. Концепция OSC

Для одновременной передачи информации двум пользователям на линии вниз используется усеченное фазовое созвездие 8-PSK, из 8 доступных позиций используются только 4 (усеченное фазовое созвездие режима EDGE), см. рис. 8, что эквивалентно использованию квадратурной фазовой модуляции QPSK.

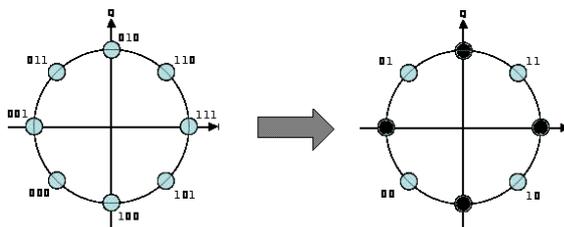


Рис. 8. Фазовые созвездия 8-PSK и QPSK

В одном модуляционном символе QPSK передается информация для двух пользователей – два бита (первый бит для одного, второй бит для другого пользователя). В качестве пары выбираются абонентские терминалы с поддержкой SAIC с приблизительно одинаковыми ослаблениями мощности сигналов в радиоканалах. Для каждого из пары терминалов принимаемый полезный сигнал может рассматриваться как сигнал GMSK, а сигнал для второго терминала является помехой для первого, причем сдвинутой по фазе на 90 градусов. Для идентификации каналов в паре и корректной демодуляции сигналов в SAIC-приемниках применяются индивидуальные обучающие последовательности (базовый набор включает 8 последовательностей, в Release 9 введен дополнительный набор из 8 последовательностей). Мощность на линии вниз регулируется одинаково для обоих терминалов.

На линии вверх терминалы излучают сигналы с модуляцией GMSK. Сигналы каждой пары терминалов передаются одновременно и на одной же частоте. В приемнике базовой станции осуществляется демодуляция MIMO-сигналов. Для идентификации каналов в паре также применяются индивидуальные обучающие последовательности.

Ортогональному уплотнению могут подвергаться как полноскоростные, так и полускоростные каналы. При объединении полускоростных каналов в одном временном слоте переносятся четыре речевых канала, такая схема способствует значительному повышению емкости сети. В случае полноскоростных каналов в слоте переносятся два речевых канала со сравнительно высоким качеством (в классической системе в слоте могут передаваться два полускоростных канала, т.е. с некоторой потерей качества речи), в этом случае увеличивается число голосовых каналов с высоким качеством (реализация имеет смысл, если в сети не требуется увеличение емкости).

Потенциально OSC может удвоить емкость сети, но поскольку для обработки сигналов с многопозиционной модуляцией и сигналов MIMO требуется более высокое отношение сигнал/шум, чем для традиционных каналов с GMSK, OSC можно реализовать не по всей площади соты, а только на ее части. Например, при проникновении SAIC-терминалов 50% количество голосовых соединений в сети можно увеличить примерно на 25%.

На базе концепции OSC разработана и стандартизирована в Release 9 в 2009г. функциональность VAMOS (Adaptive Multi-user channels on One Slot). Отличие VAMOS от OSC состоит в том, что:

- используется дополнительный набор из 8 обучающих последовательностей для упрощения спаривания терминалов (функциональность VAMOS I),
- используется адаптивная QPSK-модуляция (AQPSK – Adaptive QPSK) для отдельной регулировки мощности для каждого из пользователей на линии вниз (функциональность VAMOS II), см. рис. 9.

По сравнению с OSC добавленные возможности позволяют увеличить выигрыш по емкости примерно на 10%.

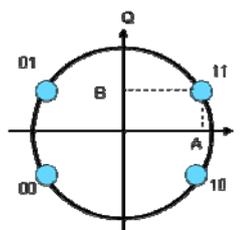


Рис. 9. Пример фазового созвездия AQPSK

Объединять можно не только пары терминалов VAMOS, в пару могут входить терминал VAMOS и обычный терминал, если мощность передачи для обычного терминала выше, чем для VAMOS-терминала [5]. Например, для случая на рис. 9, при $|A| > |B|$ мощность излучения передатчика для VAMOS-терминала должна быть равна B , а для обычного терминала – A .

Ожидать коммерческого внедрения VAMOS можно только после того, как проникновение новых VAMOS-терминалов достигнет критической массы. Как показывает практика, массовое внедрение функциональностей, предусматривающих использование новых абонентских устройств, происходит не раньше через 5 – 7 лет после стандартизации. Но пока может использоваться базовая версия этой функциональности – OSC.

Динамическое назначение каналов

Динамическое назначение каналов (DFCA – Dynamic Frequency and Channel Allocation) – алгоритм, реализуемый на уровне контроллеров базовых станций, см. рис. 10, в синхронной сети радиодоступа с применением циклических прыжков по частоте. Циклические прыжки по частоте применяются для передатчиков TCH, для передатчиков BCCH применяется кластерный частотный план, несущие BCCH в алгоритме DFCA не используются. В контроллерах базовых станций аккумулируются статистические данные о степени перекрытия сот, текущей нагрузженности радиоресурсов, отчеты абонентских станций об уровнях сигналов соседних сот. Благодаря синхронности сети информация о нагрузженности радиоресурсов может быть детализирована до уровня временных слотов.

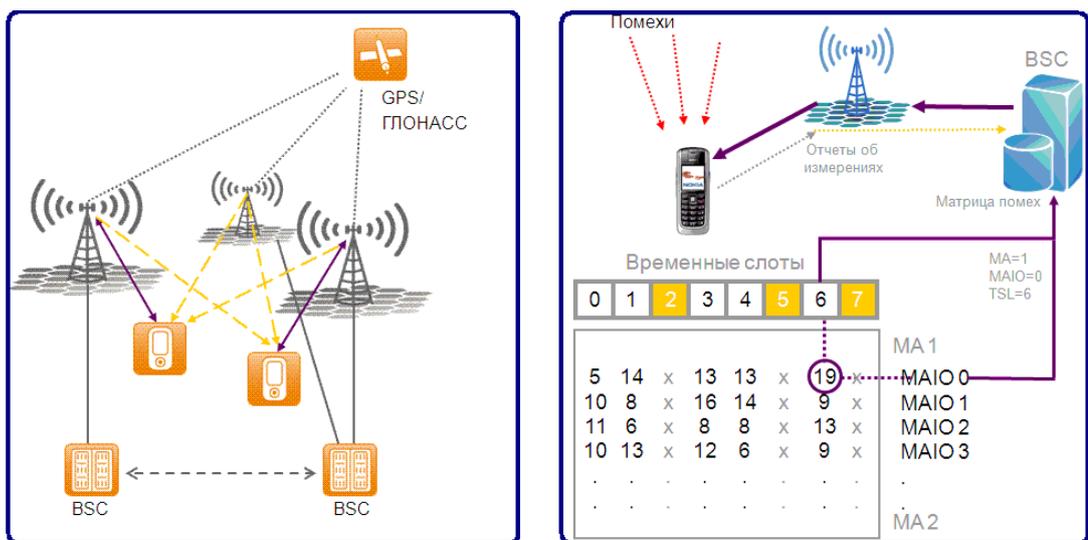


Рис. 10. Принципы реализации алгоритма DFCA

В контроллере базовых станций формируется матрица помех для всех свободных временных слотов, всех заданных наборов частот (MA – Mobile Allocation) и сдвигов последовательностей прыжков по частоте (MAIO – Mobile Allocation Index Offset). При установлении нового вызова или хэндовера анализируется класс абонентской станции и требуемое для нее отношение сигнал/шум (например, 3 дБ для SAIC AMR-FR, 6 дБ для AMR-FR, 9 дБ для AMR-HR, 12 дБ для EFR и т.п.), затем выбираются ресурсы (слот, набор частот, сдвиг прыжков по частоте), обеспечивающие требуемое отношение сигнал/шум.

Алгоритм DFCA улучшает распределение отношения сигнал/шум в сети, позволяет повысить степень использования полускоростных соединений и получить выигрыш по емкости от 40% до 70%. Этот алгоритм можно рассматривать как алгоритм координации помех между сотами с диспетчеризацией частотно-временных ресурсов (один из методов борьбы с внутрисистемными помехами в системах LTE).

Эффект от внедрения новых функциональностей

Рассмотрим емкость сайтов, если оператору доступен спектр шириной 10 МГц, при поэтапном внедрении доступных уже сейчас функциональностей: прыжки по частоте + кодеки AMR, ортогональное уплотнение каналов OSC, динамическое назначение каналов DFCA (см. рис.

11). Во всех случаях для несущих ВССН предусматривается кластерный частотный план с коэффициентом переиспользования частот 12.

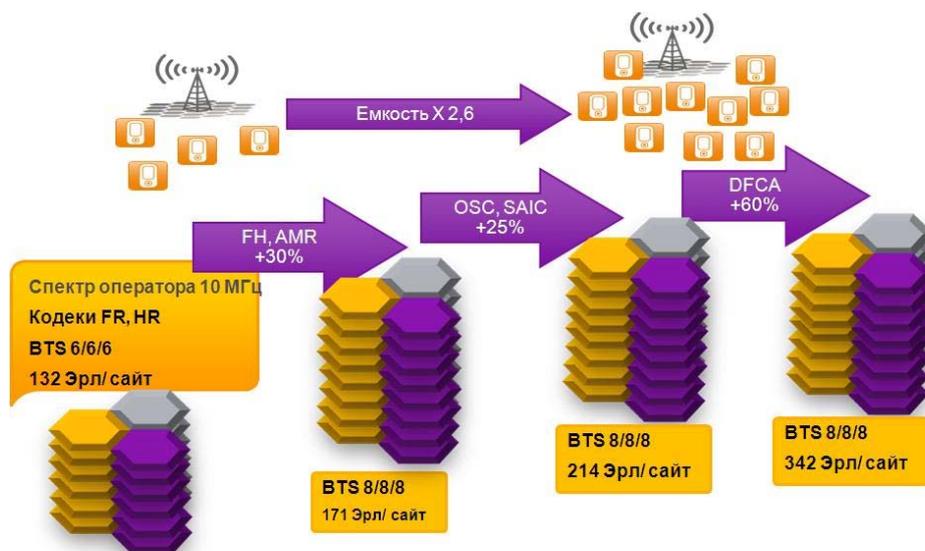


Рис. 11. Рост емкости базовой станции GSM

1. В качестве базового сценария рассматривается сеть с классическим кластерным частотным планом с коэффициентом переиспользования частот ТСН 7. Число приемопередатчиков в каждом секторе при этом ограничивается 6. При применении кодеков FR и HR и доле вызовов HR 25% емкость каждого сектора составит 44 Эрл, а трехсекторного сайта – 132 Эрл.

2. При внедрении прыжков по частоте по всему пулу несущих ТСН можно перейти к эквивалентному коэффициенту переиспользования частот 1, при этом за счет рандомизации помех и при использовании AMR-кодеков можно повесить степень использования частотных ресурсов, увеличить число приемопередатчиков в секторе (в этом примере до 8). В отсутствие ограничений на аппаратную конфигурацию сайтов можно удвоить число приемопередатчиков (их количество будет ограничиваться степенью нагруженности радиоресурсов). При той же доле HR-вызовов 25% емкость трехсекторного сайта составит 171 Эрл.

3. После внедрения OSC при проникновении SAIC-терминалов 50% можно получить выигрыш по емкости 25% без расширения аппаратных средств. Емкость сайта – 214 Эрл.

4. Реализация DFCA в синхронной сети радиодоступа за счет селективной диспетчеризации ресурсов позволяет получить заметный выигрыш по емкости даже без увеличения числа приемопередатчиков (только с добавлением приемников GPS/ГЛОНАСС на каждом сайте). Емкость сайта – 342 Эрл.

В итоге, в рассматриваемом примере голосовая емкость сети может быть увеличена в 2,6 раза.

Выигрыш от внедрения нового функционала может варьироваться в зависимости от доступного оператору спектра: чем меньше пул канальных ресурсов, тем менее эффективно они задействуются. И, наоборот чем больше полоса, тем больше выигрыш по емкости. Но даже при

наличии очень ограниченной полосы можно получить заметный прирост емкости. Если у оператора для GSM доступны 5 МГц при описанных выше условиях емкость сети можно увеличить в 2,2 раза.

Услуги передачи данных

К сожалению, описанные достижения не могут быть в полной мере спроецированы на услуги передачи данных в сетях GSM в режимах GPRS и EDGE (пиковая скорость 296 кбит/с). Конечно, основные функциональности, повышающие спектральную эффективность - FH, SAIC, DFCA, могут применяться и в режимах GPRS и EDGE, но скорость передачи данных (даже пиковая скорость, не говоря уже о средней скорости) все равно несравнима со скоростями в сетях 3G/4G.

Для повышения скорости передачи в сетях GSM в Release 7 в 2007 г. были стандартизированы функциональности EDGE-Evolution:

- Объединение двух несущих для доставки данных одному пользователю (Dual Carrier), пиковая скорость – 592 кбит/с (2 несущие по 5 слотов, 8-PSK);

- Фаза 2 EDGE (EGPRS-2 – Enhanced General Packet Radio Service Phase 2), предусматривающая повышение кратности квадратурно-амплитудной модуляции до 32, пиковая скорость – 1184 кбит/с (2 несущие по 5 слотов, 32-QAM).

Однако, проблемы внедрения EDGE-Evolution связаны с отсутствием экосистемы и наличием конкурирующих технологий – технологий 3G/4G. Производители чипсетов и терминалов сконцентрировали свои усилия на разработку абонентского оборудования следующих поколений.

Потребности рынка

Глядя на новые функциональности, способствующие повышению емкости, понимаешь, что GSM не исчерпал своих возможностей, но только «технологических» возможностей. С точки зрения бизнеса ситуация – иная: сети GSM достигли насыщения, прирост абонентской базы практически не происходит, тарифы на голосовую связь постоянно снижаются, доходы от голосовой связи не увеличиваются.

У операторов отсутствует мотивация внедрения описанного выше нового функционала, их спектра хватает (а иногда даже с избытком хватает) для поддержки голосовых услуг в существующих объемах, но при этом недостаточно ресурсов для передачи данных. Новые диапазоны частот для технологии 3G/4G есть не у всех операторов GSM в нашей стране, и только ограниченное число операторов их получают после проведения конкурсов на частоты в диапазонах 800 и 2600 МГц. Для таких операторов единственный способ внедрения 3G/4G – рефарминг их собственного спектра 900/1800 МГц. Часть спектра GSM можно совершенно безболезненно отдать под 3G/4G, и голосовые услуги совершенно не пострадают – новые технические решения GSM позволят не только поддержать прежнюю емкость, но даже при необходимости и нарастить ее. В данном случае рефарминг зависит уже не от технологических возможностей, а от политических – от позиции регулятора в отношении технологически нейтрального использования спектра. Но не внедрять новые технологии – это лишать пользователей передовых услуг и попросту недоиспользовать дефицитные частотные ресурсы.

Перспективы GSM

На сегодняшний день голосовые услуги – это главный источник доходов всех операторов GSM. По статистике 80% всех сессий в мобильных сетях по всему миру - это сессии, устанавливаемые в сетях GSM. Но поведение пользователей мобильных сетей меняется - растет потребление услуг передачи данных. GSM-операторам придется развивать технологии широкополосного доступа.

В некотором смысле, развивая широкополосный доступ, сотовые операторы рубят сук, на котором сидят. В какой-то момент они столкнутся с ситуацией, когда пользователи откажутся от традиционных голосовых услуг с коммутацией каналов в пользу дешевого «голоса поверх IP» (VoIP – Voice over IP). Операторам придется радикально менять свои бизнес-модели, чтобы одновременно сохранить прибыльность и привлекательность услуг для абонентов.

По некоторым оценкам GSM проживет еще не менее 10 лет, на рубеже 20-х годов эта технология останется востребованной, в основном, за счет предоставления услуг связи «машина-машина». А банкоматам, платежным системам, датчикам, оснащенным модемами GPRS/EDGE, не нужна большой пропускной способности. Этот парк терминалов уже установлен и он не требует модернизации. GSM будет жить, пока не пройдет смена генерации оконечных устройств.

Литература

1. T. Halonen, J. Romero and J. Melero, «GSM, GPRS and EDGE Performance», Second Edition, John Wiley & Sons, 2003.
2. P. Rysavy, «Voice Capacity Enhancement for GSM Evolution to UMTS», 3G Americas, July 18, 2002.
3. GP-070214 «Voice Capacity Evolution with Orthogonal Sub Channel», 3GPP TSG GERAN#33, Seoul, Korea, February 2007.
4. 3GPP TR 45.914 V10.1.0 «Circuit switched voice capacity evolution for GSM/EDGE Radio Access Network (GERAN) », November 2011.
5. M. Saily, G. Sebire, E. Riddington, «GSM/EDGE: Evolution and Performance», John Wiley & Sons, 2010.
6. Решение ГКРЧ № 06-12-03-001 «Об использовании методов повышения эффективности использования радиочастотного спектра в сетях подвижной радиотелефонной связи стандарта GSM 900/1800 на территории Российской Федерации» от 27.02.2006.
7. Решение ГКРЧ № 09-03-02 «О повышении эффективности использования радиочастотного спектра в сетях сухопутной подвижной радиосвязи стандарта GSM-1800 на территории Российской Федерации» от 28.04.2009.