

УДК 621.396.218

ПОВЫШЕНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СЕТЯХ GSM НА ОСНОВЕ КОГНИТИВНОГО РАДИО

Ю.А. Громаков, генеральный директор ОАО «Интеллект Телеком», д.т.н., профессор; yuag@i-tc.ru

В.В. Родионов, аспирант Московского авиационного института

К.С. Настасин, аспирант Московского авиационного института

Ключевые слова: мобильные и беспроводные технологии, сотовая связь, передача данных, GSM, когнитивное радио.

Введение. Несмотря на быстрое развитие сетей сотовой связи стандартов UMTS, cdma2000 и LTE, единственной глобальной сетью остается GSM. В сетях GSM предоставляются услуги более чем 4 млрд абонентов в 219 странах. В 2010–2011 гг. объем речевого трафика в глобальной сети GSM вырос практически в 3 раза [1]. Тенденция к снижению тарифов на услуги сотовой связи заставляет операторов поддерживать разработку новых технологий, сокращающих расходы и повышающих эффективность GSM. Известные разработки Nokia Siemens Networks (NSN) [1] и Ericsson [2], основанные на использовании технологии VAMOS*, позволяют вдвое увеличить емкость сетей GSM, не требуя новых инвестиций на оборудование. Усилия по стандартизации характеристик, связанных с этой технологией, нашли отражение в 3GPP Release 9. В рамках ITU опубликован документ «Снижение энергетических затрат при внедрении «Сети сотовой связи с переносом емкости» для сельских и отдаленных районов», определяющий существенную экономию капитальных и операционных затрат при строительстве сетей GSM [3].

Главной причиной ограничения перспективности использования GSM является сравнительно низкая скорость передачи данных в сети радиодоступа (RAN).

В концепции развития сотовой связи 3GPP будущие сети RAN должны быть «умными», с элементами адаптации по спектру и уровню излучения, обеспечивать динамическое распределение спектра, более высокие значения пропускной способности и энергетической эффективности, активное разделение ресурсов [4]. Этим требованиям удовлетворяет концепция когнитивного радио [5–7].

В данной работе рассматривается способ повышения скорости передачи данных в сетях GSM на принципах когнитивного радио.

Проблемы развития сотовой связи GSM и последующих поколений. Действующие сети GSM практически полностью удовлетворяют требованиям пользователей по речевым сервисам, но по скорости передачи данных не могут соперничать с сетями сотовой связи на базе технологий UMTS и LTE. Так, максимальная скорость передачи данных в стандарте GSM Evolution (EDGE) составляет 1,894 Мбит/с, тогда как в UMTS HSPA+ она равна 42 Мбит/с, а в LTE Release 10 – 3 Гбит/с. Причина в том, что ширина полосы частот радиоканала GSM значительно меньше, чем в UMTS и LTE. Расширение полосы частот в новых системах сотовой связи стало возможным благодаря переходу в более высокие диапазоны радиочастот. Однако из-за физических ограничений

дальность распространения радиоволн на более высоких частотах снижается [4] (табл. 1), что приводит к увеличению:

- количества базовых станций (БС) и соединительных линий между БС и контроллером;
- количества хэндоверов при движении абонентской станции (АС), что снижает вероятность успешного завершения вызова;
- затрат ресурсов сети сотовой связи на управление процессами соединения, хэндовера и сигнализации при движении абонента в зоне связи с малыми размерами сот.

Из-за дефицита частотного ресурса сети сотовой связи ограничены в скорости передачи данных.

Скорость передачи данных в современных системах связи увеличивается также за счет использования видов модуляции сигнала высокого уровня, требующих большего отношения сигнал/шум на входе приемника. В этой связи заявленные характеристики систем UMTS и LTE по скорости передачи данных могут быть обеспечены только на небольших расстояниях от БС. В этих условиях актуальна задача поиска и исследования новых способов построения сетей сотовой связи, обеспечивающих высокие скорости передачи данных, и в первую очередь это относится к наиболее распространенному стандарту сотовой связи – GSM.

Принципы когнитивного радио. В настоящее время в мире активно разрабатываются системы на основе когнитивного радио (cognitive radio). Этот термин впервые (в 1999–2000 гг.) ввел Дж. Митола [5, 6] для описания «умных» радиосистем, способных автономно принимать решения на основе собранной с помощью заложенной в модели информации о радиосреде, а также обучаться и использовать накопленную в процессе работы информацию.

В 2003 г. Федеральная комиссия связи (FCC) США определила когнитивное радио как «радиосистему, которая может изменять свои параметры радиоизлучения в зависимости от окружающей среды, в которой она действует» [7]. В отчете ITU-R M.2117 когнитивное радио обозначено как радиосистема, которая в своей работе использует технологии радиосвязи с программируемыми параметрами, адаптивного радио и другие технологии для автоматического выбора режима работы. Такая радиосистема может накапливать зна-

Таблица 1. Дальность радиосвязи в зависимости от рабочего диапазона частот

Частота, МГц	Радиус соты, км	Площадь соты, км ²	Отношение площадей (к 950 МГц)
450	50	7850	0,3
850	30	2826	0,8
950	27	2289	1,0
1800	14	615	3,7
1900	13,3	555	4,1
2100	12	452	5,1

* Voice services over Adaptive Multi-user channels on One Slot – голо- совые сервисы поверх адаптивного многопользовательского канала на одном тайм-слоте.

ния об условиях эксплуатации, способна к динамической и самостоятельной адаптации своих эксплуатационных параметров к соответствующей среде и запоминанию результатов своих действий и используемых моделей для той или иной окружающей среды [8].

В мире растет потребность в радиочастотном спектре, притом что большая его часть уже занята. В мировой практике частоты назначаются конкретному юридическому лицу на определенную территорию на долговременной основе. Однако назначенные на данной территории частоты чаще всего используются не постоянно, а по мере необходимости. Иными словами, многие частотные диапазоны неравномерно загружены по времени и пространству.

Системы, построенные по принципам когнитивного радио, используют на вторичной основе не занятые в текущий момент участки спектра («белые пятна») либо учитывают особенности сигнала первичной сети для обеспечения совместной работы. При этом главный критерий работы таких систем – отсутствие помех первичной сети.

Разработанный IEEE 802.22 стандарт беспроводной передачи данных полностью основан на принципах когнитивного радио. Он предполагает работу новой радиосистемы в полосе частот, распределенной телевидению на первичной основе, и при этом не создает помех телевизионным приемникам. Эта радиосистема ищет в работе телевизионных передатчиков «белые пятна» по частотам, времени и пространству. Также в целях исключения помех телевидению осуществляется управление мощностью излучения передатчиков вторичной радиосистемы [9].

Для определения свободного частотного ресурса в системах когнитивного радио используются [10, 11]:

- информация из базы данных о распределении спектра частот на конкретной территории;
- данные оперативного мониторинга спектра частот;
- контрольный канал для оповещения станций когнитивного радио о занятом частотном ресурсе;
- информация из каналов управления и синхронизации первичной сети.

Способ передачи данных с высокой скоростью в сетях GSM на принципах когнитивного радио. На существующую макросотовую топологию сети (сетей) GSM накладывается взаимодополняющая микросотовая сеть, работающая в тех же частотных диапазонах – 900 и/или 1800 МГц (рис. 1). Под макросотовой сетью будем понимать действующую стандартную GSM-сеть в диапазонах частот 900 и/или 1800 МГц, под микросотовой – наложенную сеть связи с сотами меньших размеров (50–300 м).

Рассмотрим подробнее принцип топологического совмещения микросотовой и макросотовой сетей GSM. В существующих сетях на территории каждой конкретной макросоты действующей сети GSM используются не все предусмотренные стандартом радиоканалы, что дает возможность для работы наложенной микросотовой сети на данной территории задействовать свободные частоты GSM при условии обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС). Пример совместного использования полос радиочастот 880–915 и 925–960 МГц макросотовой сетью GSM и наложенной микросотовой сетью приведен на рис. 2.

Для обеспечения ЭМС сетей параметры излучения базовых станций макросотовой сети GSM и микросотовой сети передачи данных выбираются с учетом их частотно-территориального разнеса, исключающего взаимное негативное влияние. Общими элементами в обеих сетях являются центр

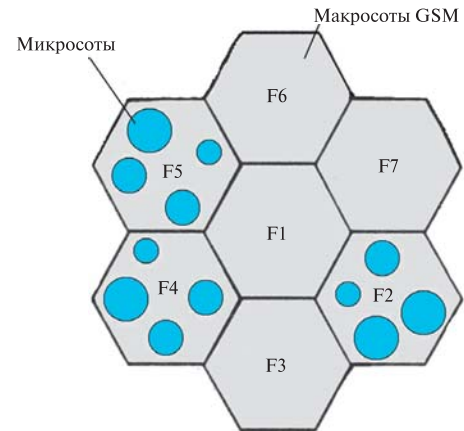


Рис. 1. Наложение микросотовой сети на макросотовую сеть GSM

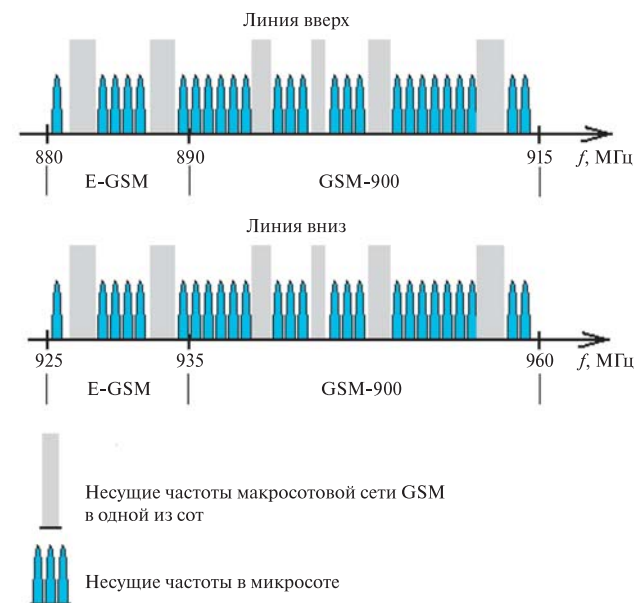


Рис. 2. Пример совместного использования полос радиочастот макросотовой сетью GSM и наложенной микросотовой сетью

коммутации (MSC), домашний и визитный регистры (HLR и VLR), центр аутентификации (AuC), центр управления и эксплуатации сети (OMC). Таким образом, все функции авторизации, хэндовера, коммутации, взаимодействия с внешними сетями выполняются инфраструктурой действующей сети GSM (рис. 3).

Оценка максимальной скорости передачи данных взаимодополняющей микросотовой сети при реализации различных схем повторного использования частот. Известно несколько моделей построения кластеров с различными коэффициентами повторного использования частот в сотах (K) [12].

Максимальное число частотных каналов (N_{\max}) в GSM-900, GSM-1800 и E-GSM равно $N_{\max} = N_{\text{GSM-900}} + N_{\text{GSM-1800}} + N_{\text{EGSM}} = 124 + 374 + 50 = 548$. Число свободных частотных каналов (не используемых в кластере) $N_{\text{своб}}$ определяется по формуле $N_{\text{своб}} = N_{\max} - KN_{\text{чс}}N_{\text{оп}}$, где $N_{\text{чс}}$ – количество частот, приходящих на один сектор; $N_{\text{оп}}$ – количество операторов, работающих на данной территории.

Теоретически возможная суммарная скорость передачи данных в секторе (V_{\max}) при использовании стандартной в GSM модуляции GMSK равна $V_{\max} = N_{\text{тс}} V_{\text{макс тс}} N_{\text{своб}}$, где $N_{\text{тс}}$ – число тайм-слотов во временном TDMA-кадре GSM; $V_{\text{макс тс}}$ – максимальная скорость передачи данных в одном тайм-слоте TDMA-кадра GSM. В одном TDMA-кадре содержится

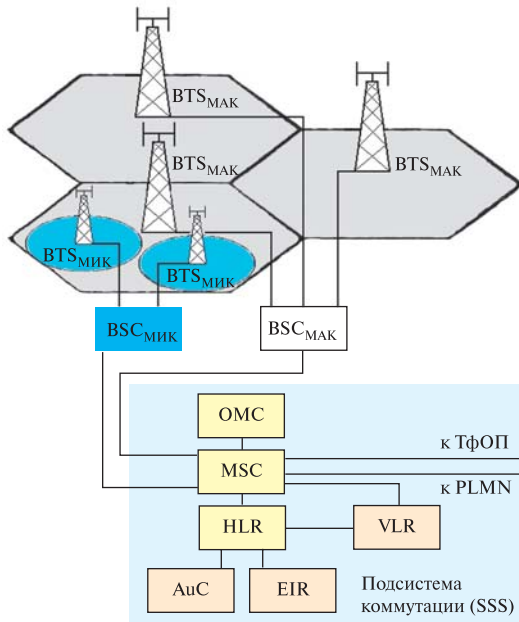


Рис. 3. Структурная схема совмещенной сети

8 тайм-слотов. Максимальная скорость передачи данных в одном тайм-слоте составляет 14,4 кбит/с.

Количество свободных частотных каналов и максимальная скорость передачи данных в GSM-900, GSM-1800 и E-GSM зависят от коэффициента повторного использования частот и числа частот, используемых в соте (секторе) БС. В табл. 2 и 3 приведены данные для наиболее распространенных моделей построения кластеров, характерные при работе на одной территории трех операторов, использующих одинаковые модели построения кластеров.

Из табл. 3, в частности, следует, что максимальная скорость передачи данных для трех операторов сотовой связи при $K=7$, четырех частотных каналах в каждой соте и одновременном использовании диапазонов частот GSM-900, GSM-800 и E-GSM составляет 38 Мбит/с на соту.

Адаптивный выбор рабочих частот для микросотовой сети передачи данных. При функционировании микросотовой сети передачи данных информация о свободных частотах поступает в режиме реального времени на основе мониторинга занятых действующей сетью GSM частот. В общем случае для исключения помех макросотовой сети GSM необходима оценка занятого в конкретной точке частотного ресурса на стороне как БС, так и АС (рис. 3). После этого проводится выбор и согласование свободных частот и начинается процесс передачи данных в микросотовой сети.

Так как каждая БС микросотовой сети имеет меньшую зону обслуживания, чем БС макросотовой сети GSM, можно принять, что в пределах микросоты распределение занятых частот для макросотовой сети GSM одинаковое. Следовательно, нет необходимости определять защищенные (занятые) частоты для микросотовой сети как на БС, так и на абонентских станциях. Достаточно оставить измерительный приемник только на БС микросотовой сети и транслировать данные о занятых частотах в пределах рабочей зоны. При этом упрощается конструкция АС, высвобождаются ее вычислительные ресурсы и уменьшается объем служебного трафика между БС и АС, необходимый для постоянного согласования рабочих частот в процессе передачи данных.

Если БС микросотовой сети располагается в зоне действия сети GSM, рабочие частоты которой заранее известны (например, обе сети принадлежат одному оператору),

Таблица 2. Количество свободных частотных каналов в GSM-900, GSM-1800 и E-GSM в случае работы трех операторов

K	N _{св}					
	1	2	3	4	5	6
7	485	422	372	330	288	248
9	467	390	336	282	239	212
12	440	354	282	230	194	158

Таблица 3. Максимальная скорость передачи данных (Мбит/с) при использовании одновременно GSM-900, GSM-1800 и E-GSM в случае работы трех операторов

K	N _{св}					
	1	2	3	4	5	6
7	55,87	48,61	42,85	38,02	33,18	28,57
9	53,8	44,93	38,71	32,49	27,53	24,42
12	50,69	40,78	32,49	26,5	22,35	18,2

отпадает необходимость в мониторинге занятых частот БС микросотовой сети. Появляется возможность заранее ее запрограммировать на исключение излучения запрещенных в данном месте частот, что позволит обойтись без приемника-обнаружителя занятых каналов. Трансляция данных о занятых частотах на АС микросотовой сети должна происходить в том же режиме, что и в предыдущем случае.

Формирование OFDM-сигнала в микросотовой системе передачи данных с исключением рабочих частот, занятых макросотовой сетью GSM. При построении микросотовой системы передачи данных целесообразно использовать технологию OFDM [13]. Это позволит гибко управлять шириной полосы излучения сигнала в зависимости от количества занятых частот макросотовой сетью GSM в конкретном месте и повысит эффективность приема данных в условиях многолучевости.

К преимуществам OFDM в данном случае можно отнести высокую спектральную эффективность из-за «почти прямоугольного частотного спектра» для большого числа поднесущих, простую цифровую реализацию с использованием быстрого преобразования Фурье, относительную простоту приемников, гибкую по спектру реализацию режектирования поднесущих OFDM программными методами.

В числе недостатков: высокий пик-фактор (отношение пиковой мощности к средней), требующий применения высоколинейных усилителей; потери в спектральной эффективности из-за защитного интервала с частотами GSM; большое влияние фазового шума, вызванного несовершенством передатчика и генераторов приемника, на работу системы; необходимость обеспечения точной частотной и временной синхронизации.

Исключение запрещенных частот из общей полосы частот сети GSM в микросотовой сети происходит следующим образом. Символ OFDM – это группа поднесущих частот, в данный момент переносящая биты параллельных цифровых потоков. Комплексная огибающая одного OFDM-символа длительностью T , который начинается в момент времени t_k , имеет вид [14]:

$$\dot{u}(t) = \sum_{i=0}^{N_s-1} \dot{d}_i e^{j2\pi \frac{i}{T}(t-t_k)}; t_k \leq t \leq t_k + T, \quad (1)$$

где \dot{d}_i – комплексное число, представляющее амплитуду и начальную фазу i -й поднесущей OFDM-сигнала; N_s – число поднесущих колебаний в OFDM-символе. Схема формирования комплексных огибающих OFDM-символов на примере четырех поднесущих ($N_s=4$) представлена на рис. 4, а со-

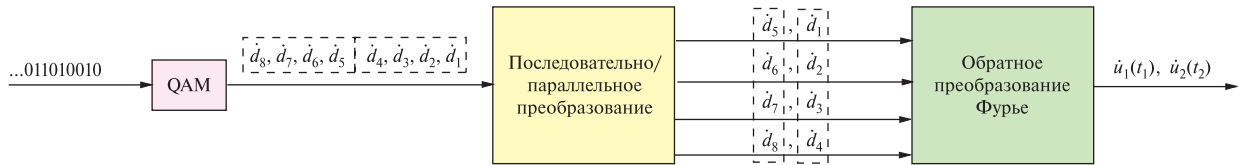


Рис. 4. Схема формирования комплексных огибающих OFDM-символов

ответствующая спектральная плотность OFDM-сигнала для $N_s=4$ – на рис. 5.

В случае, когда известно, на каких частотах GSM нельзя вести передачу данных в микросотовой сети, надо исключить излучение на этих частотах, предварительно пересчитав, какие поднесущие совпадают с запрещенными частотами. Если требуется исключить излучение на i -й частоте макросотовой сети GSM, то согласно (1) при формировании OFDM-символа нужно d_i приравнять к нулю. Например, если исключается излучение на 2-й и 3-й частотах, то $d_2 = d_3 = 0$ (рис. 6).

Для формирования OFDM-символов с возможностью исключения частот первоначальную схему следует изменить, установив нулевые символы на заданных позициях. Это можно делать во время последовательно-параллельного преобразования потока QAM-символов, зная номера исключаемых частот. На рис. 7 представлена измененная схема формирования комплексных огибающих OFDM-символов с исключением занятых частот (в данном случае 2-й и 3-й).

При этом итоговая скорость передачи данных в микросотовой сети уменьшается пропорционально количеству ис-

ключаемых поднесущих. Во избежание потери информации в процессе обнуления поднесущих скорость информационного битового потока на входе QAM-модулятора должна быть согласована с доступным частотным ресурсом. Согласно модели взаимодействия открытых систем OSI задачу управления скоростью битового потока решает транспортный уровень [15].

Алгоритмы процесса передачи данных в микросотовой сети.

Для осуществления этого процесса возможны различные сценарии организации линии вниз (БС–АС) и линии вверх (АС–БС):

- на линии вниз – на свободных в макросотовой сети частотах, на линии вверх – с помощью GPRS/EDGE (рис. 8);
- на свободных частотах на линии вверх и на линии вниз (рис. 9).

При использовании GPRS/EDGE на линии вверх учитывается асимметричность трафика в направлении от/к абоненту. Достоинство этого варианта – максимальная скорость на линии вниз. Недостатки: отсутствие или загруженность GPRS/EDGE-каналов, исключающие работу микросотовой сети; необходимость изменения в действующей сети GSM в части координации работы подсистемы GPRS/EDGE и микросотовой сети передачи данных; ограниченная скорость передачи данных на линии вверх.

Достоинствами передачи данных на свободных частотах в обоих направлениях являются автономность работы от загруженности или наличия GPRS/EDGE и гибкое управленческие скоростью в направлениях от/к абоненту. Недостаток – меньшая скорость передачи данных на линии вниз, чем при использовании OFDM только на линии вниз.

Оценка максимально допустимой мощности излучения базовой станции микросотовой сети. Рассмотрим два сценария взаимодействия двух сетей:

- 1) БС микросотовой сети находится рядом с АС макросотовой сети;
- 2) БС микросотовой сети находится рядом с БС макросотовой сети.

Расчеты проводились при максимальном влиянии БС микросотовой сети на АС и БС макросотовой сети: АС макросотовой сети максимально удалена от БС макросотовой сети, т.е. находится на границе зоны обслуживания БС; БС микросотовой сети располагается в непосредственной близости от приемников БС и АС макросотовой сети.

Так как OFDM-поднесущие, совпадающие с частотами, занятыми GSM, не излучаются, между рабочими частотами данных сетей устанавливается частотный разнос. Исходя из максимального защитного отношения к помехе (в случае

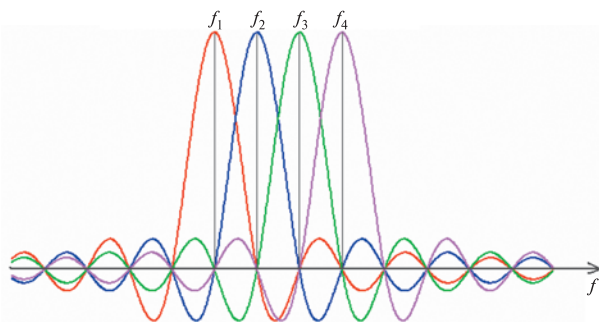


Рис. 5. Спектральная плотность OFDM-сигнала для $N_s=4$

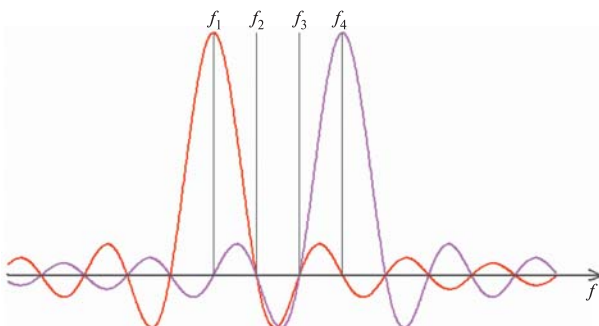


Рис. 6. Спектральная плотность OFDM-символа с исключенными частотами

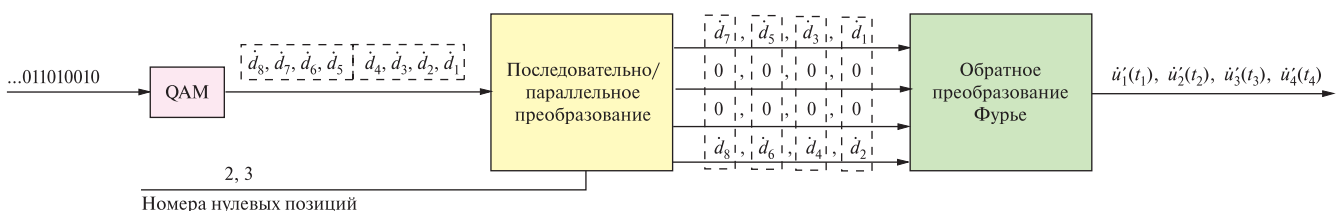


Рис. 7. Схема формирования комплексных огибающих OFDM-символов с исключением занятых частот

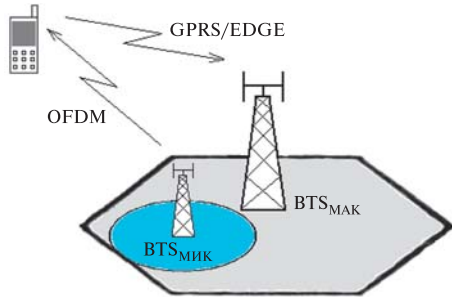


Рис. 8. Использование OFDM только на линии вниз

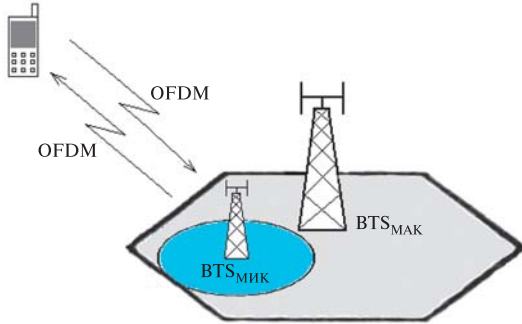


Рис. 9. Использование OFDM на линии вниз и на линии вверх

использования EDGE), стандартных значений параметров оборудования GSM, для коэффициента усиления антенны БС микросотовой сети 5 дБ, высоты ее размещения 30 м, для OFDM-сигнала, состоящего из 10 поднесущих с разномом между ними 40 кГц, можно установить зависимость максимально допустимой мощности излучения БС микросотовой сети от расстояния и частотного разноса для первого (рис. 10) и второго (рис. 11) сценариев.

Как следует из графиков, при частотном разноме, равном одному частотному интервалу между OFDM-поднесущими (при указанных условиях), допустимая мощность излучения БС микросотовой сети при использовании частотного разделения каналов GSM может составлять около 100 мВт при незначительном территориальном разноме.

Заключение. Рассмотренные варианты построения совмещенных макросотовой и микросотовой сетей на принципах когнитивного радио позволяют обеспечить параллельно с работой основной сети GSM передачу данных со скоростью в несколько десятков мегабит в секунду в зависимости от конфигурации действующей сети GSM.

ЛИТЕРАТУРА

1. Doubling GSM voice capacity with the Orthogonal Sub Channel/ Nokia Siemens Networks// http://www.nokiasiemensnetworks.com/NR/rdonlyres/FFB751DF-E839-41C7-A7F4-D3B9B9490266/0/OSC_TechnologyBrief_v10.pdf.
2. Evolution of GSM voice// http://www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/100716_VAMOS_approved.pdf.
3. Снижение энергетических затрат при внедрении «Сети сотовой связи с переносом емкости» для сельских и отдаленных районов// Вклад ОАО «Интеллект Телеком» № 2/94-Р 2-й ИК Бюро развития электросвязи МСЭ от 18 июля 2011.
4. Громаков Ю.А. Концепция развития мобильной и беспроводной связи общего пользования// Электросвязь. – 2008. – № 12. – С. 51–57.
5. Mitola J. III and Maguire G.Q. Cognitive radio: making software radios more personal// IEEE Personal Communications. – Vol. 6. – No. 4 – Aug. 1999. – P. 13–18.
6. Mitola J. III. Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications// Mobile Multimedia Communications

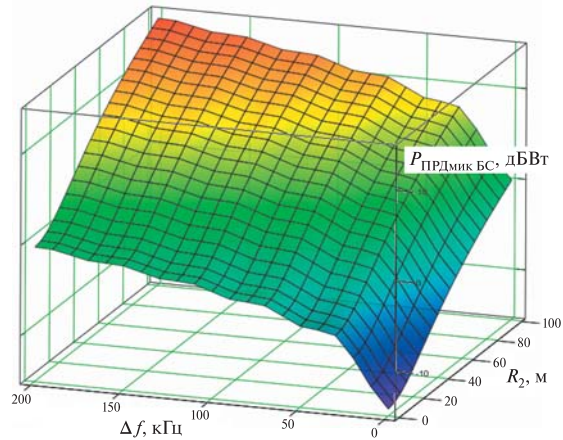


Рис. 10. Зависимость максимальной мощности излучения БС микросотовой сети от расстояния и частотного разноса для первого сценария

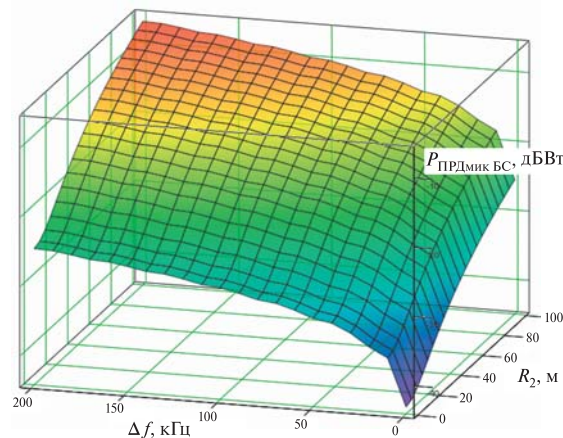


Рис. 11. Зависимость максимальной мощности излучения БС микросотовой сети от расстояния и частотного разноса для второго сценария

- (MoMuC'99), IEEE International Workshop, San Diego, CA, USA, Nov. 1999. – P. 3–10.
7. FCC ET Docket No. 03-108, Facilitating opportunities for flexible, efficient, and reliable spectrum use employing cognitive radio technologies// FCC Report and Order, March, 2005.
8. ITU-R Reports M.2117 (2007): Software defined radio in the land mobile, amateur and amateur satellite services. – ITU-R, 2007.
9. Stevenson C., Chouinard G., Zhongding L., Wendong Hu, Shellhammer S. & Caldwell W. The First Cognitive Radio Wireless Regional Area Network Standard// IEEE 802.22: // IEEE Communications Magazine, vol. 47. – No. 1. – January 2009. – P. 130–138.
10. Akyildiz I.F., Lee W.-Y., Vuran M. C., Shantidev M. A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks // IEEE Communications Magazine, vol. 46, April 2008. – P. 40–48.
11. Ghasemi A., Sousa S.E. Spectrum sensing in cognitive radio networks: Requirements, challenges, and design trade-offs// IEEE Communications Magazine, vol. 46, April 2008. – P. 32–39.
12. Громаков Ю.А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи. – М.: Эко-Трендз, 1998.
13. Nee R. van, Prasad R. OFDM for wireless multimedia communications. – N.Y.: Artech House, 2000.
14. Волков Л.Н., Немировский М.С., Шинаков Ю.С. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики. – М.: Эко-Трендз, 2005.
15. ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-1-99. Информационная технология. Взаимосвязь открытых систем. Базовая эталонная модель. Ч. 1. Базовая модель. – М.: Стандартинформ, 2006.