

Оптимизация ансамбля OFDM-сигналов в сетях мобильной связи

Р.С. Аверьянов, директор по производственной деятельности ООО «НСТТ»; arsn@nxtt.org
А.О. Шорин, технический директор ООО «НСТТ»; as@nxtt.org

УДК 621.396:519.83

Аннотация. Рассмотрено влияние скорости движения абонентов на производительность сотовых сетей стандартов LTE и McWILL. Определены скорости движения, на которые сети LTE и McWILL настроены наилучшим образом. Показано, что эти скорости зависят от частотного диапазона. Установлено, что при скоростях движения более 35 м/с в диапазоне 2600 МГц показатели производительности сети LTE могут снижаться на 22%. Сеть McWILL обладает более высокой устойчивостью, так как для нее базовыми являются диапазоны 340, 420 и 1800 МГц, в которых подвижность абонентов имеет менее заметное влияние.

Ключевые слова: LTE, McWILL, OFDM, эффект Доплера, размер ансамбля OFDM.

ВВЕДЕНИЕ

Сети мобильной связи 4G активно используют сигналы с OFDM-модуляцией. Для сетей связи общего пользования утвержден стандарт LTE, а в сетях связи корпоративных пользователей в мире широко применяется стандарт McWILL. Для обеспечения наиболее «комфортных» или оптимальных условий использования указанных стандартов необходимо определить, как фактор мобильности может влиять на работу радиointерфейса. Действительно, чем больше размер ансамбля OFDM, тем меньше в относительном представлении размер защитных интервалов. При этом спектральная эффективность системы возрастает, но одновременно с ростом ансамбля увеличивается длительность тактовой посылки OFDM-сигнала. Возрастает негативный эффект от ошибок синхронизации по частоте и негативное влияние доплеровских сдвигов. Следовательно, должен существовать некоторый конечный оптимальный размер ансамбля (длительности тактового интервала) OFDM-сигнала, при котором для заданных скоростей перемещения абонентов значения несущей частоты и среднего показателя отношения сигнал/шум (ОСШ) в канале будет наблюдаться наивысшая производительность.

Результаты работ [1, 2] позволяют определить оптимальные размеры ансамблей. С помощью теории игр [3, 4] решение может быть интерпретировано как «седловая» точка, обеспечивающая оптимизированную стратегию выбора размера ансамбля сигнала OFDM в условиях изменений скоростей движения абонентов.

МОДЕЛЬ И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

В [1] детально воспроизведен вывод аналитических соотношений для уровня межсимвольных (ISI) и меж-

поднесущих (ICI) помех, продекларированных в [5]. В качестве объекта анализа рассматривалась конструкция OFDM-сигнала в представлении выборки дискретных отсчетов. Частота выборки выбиралась в соответствии с минимально необходимым значением для корректного выполнения дискретного преобразования Фурье, формирующего амплитудно-фазовые отсчеты сигналов поднесущих на тактах. В [1, рис. 1] приведена соответствующая сигнальная конструкция, обозначения которой будем использовать ниже: N – размер ансамбля поднесущих сигнала OFDM; G – выраженный в тактах дискретизации Δt ($\Delta t = 1/(N\Delta f)$) защитный интервал; Δf – частотный разнос поднесущих; F_0 – нижняя частота рабочего диапазона сигнала OFDM; T – длительность такта сигнала OFDM ($T = (N + G)\Delta t$); L – номер такта, содержащего полезный сигнал; i_0 – номер поднесущей, принятой в качестве полезного сигнала.

На полезную компоненту (поднесущая i_0 на такте L) будут воздействовать помехи, порождаемые сигналами соседних поднесущих такта L , а также проникающими через защитный интервал остаточными воздействиями от сигналов поднесущих предыдущего такта с номером $(L-1)$. Полагаем, что помехи, порождаемые тактами более ранними, чем $(L-1)$, не имеют значимости. Для такой модели в [1] были получены аналитические соотношения для уровней:

- полезного сигнала

$$P_s = [I]^2 \left(N^2 \sum_{k=0}^G [h(k)]^2 + \sum_{k=G+1}^{N+G-1} (N+G-k)^2 [h(k)]^2 \right);$$

- межсимвольной интерференции

$$ISI = [I]^2 \sum_{k=G+1}^{N+G-1} (k-G)^2 [h(k)]^2;$$

- суммарного уровня помех от других поднесущих

$$ICI = 2[I]^2 \sum_{k=G+1}^{N+G-1} (N+G-k)(k-G)[h(k)]^2.$$

Здесь $[I]^2$ – среднее значение энергии, приходящейся на один отсчет выделенной поднесущей; $[h(k)]^2$ – среднее значение квадрата импульсной реакции радиоканала на задержке $k\Delta t$.

В [2] результаты анализа обобщены с учетом частотной расстройки на приеме. При этом учитывалось, что частотная расстройка может возникать не только из-за нестабильности работы генераторного оборудования, но и эффекта Доплера. Учет этого явления привел к преобразованным соотношениям [2] для уровней:

- сигнала

$$P_s = [I]^2 \left[\frac{\sin^2(\pi\varepsilon)}{\sin^2\left(\frac{\pi\varepsilon}{N}\right)} \sum_{k=0}^G [h(k)]^2 + \sum_{k=G+1}^{N+G-1} \frac{\sin^2\left(\pi\varepsilon \frac{N+G-k}{N}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi\varepsilon}{N}\right)} [h(k)]^2 \right]; \quad (1)$$

- межсимвольной интерференции

$$ISI = [I]^2 \sum_{k=G+1}^{N+G-1} \frac{\sin^2\left(\pi\varepsilon \frac{k-G}{N}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi\varepsilon}{N}\right)} [h(k)]^2; \quad (2)$$

- суммарного уровня помех от других поднесущих

$$ICI = [I]^2 \left[\sum_{k=0}^G \left(N^2 - \frac{\sin^2(\pi\varepsilon)}{\sin^2\left(\frac{\pi\varepsilon}{N}\right)} \right) [h(k)]^2 + \sum_{k=G+1}^{N+G-1} \left(N^2 - \frac{\sin^2\left(\pi\varepsilon \frac{k-G}{N}\right) + \sin^2\left(\pi\varepsilon \frac{N+G-k}{N}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi\varepsilon}{N}\right)} \right) [h(k)]^2 \right]; \quad (3)$$

где $\varepsilon = \delta f / \Delta f$ – относительная частотная расстройка, представленная в единицах разнеса поднесущих Δf .

В [2] выполнен анализ и получены оценки для ε с учетом режима автоподстройки частоты, построенного на корректирующих сигналах обратной связи, используемых в сотовых сетях (в том числе в сетях LTE и McWILL). Остаточная ошибка по частоте в режиме автоподстройки будет состоять из суммы компонент кратковременной нестабильности генераторного оборудования δ_s и

удвоенного доплеровского смещения $2 \frac{v F_0 + \Delta f N / 2}{c \Delta f}$, где

v – скорость движения абонента в направлении базовой станции; c – скорость света.

Технологические показатели по кратковременной нестабильности генераторного оборудования практически всегда находятся в интервале 0,001 – 0,01 ppm (10^{-9} – 10^{-8}). Поэтому даже очень небольшие скорости

движения абонента (в пределах 2 м/с) будут приводить к доминированию доплеровской составляющей в ошибке частотной подстройки над компонентой кратковременной нестабильности. При рассмотрении задачи оптимизации для относительной ошибки синхронизации можно применить приближение:

$$\varepsilon \approx 2 \frac{v F_0 + \Delta f N / 2}{c \Delta f}.$$

В [2] для относительной оценки эффективности работы OFDM-сигнала предложено использовать показатель, связанный с пропускной способностью по Шеннону, который можно вычислить на основе соотношений (1)–(3). Для показателя качества получено соотношение:

$$\rho \approx \frac{1+G/N_0}{1+G/N} \frac{\log_2\left(1+\frac{1}{z_0}\right) - \log_2\left(1+\frac{1}{z_0} - \frac{\sin^2(\pi\varepsilon N/N_0)}{(\pi\varepsilon N/N_0)^2}\right)}{\log_2\left(1+\frac{1}{z_0}\right) - \log_2\left(1+\frac{1}{z_0} - \frac{\sin^2(\pi\varepsilon)}{(\pi\varepsilon)^2}\right)}, \quad (4)$$

где z_0 – ОСШ, достигаемое на выходе устройства корреляционной обработки отдельной поднесущей при идеальных условиях частотной синхронизации; N_0 – базовое значение размера ансамбля поднесущих (1024 – для LTE и 640 – для McWILL), относительно которого оценивается эффективность.

В (4) учтено, что при изменении N меняется относительная частотная расстройка $\varepsilon \rightarrow \varepsilon N / N_0$, а эффективность использования полосы определяется отношением $N / (G + N)$. Анализируя (4), можно получить оптимальные значения размера ансамбля поднесущих сигнала OFDM, отвечающие конкретным условиям.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ

На рис. 1 и 2 приведены обобщенные результаты оценки эффективности использования ансамблей поднесущих разного размера для сигналов OFDM, применяемых в сетях LTE и McWILL в диапазоне 1800 МГц ($f_0 = F_0 + \Delta f N / 2$). По горизонтальной оси отложен размер ансамбля поднесущих N , по вертикальной – скорость перемещения v в м/с. Графики даны в виде срезов («геодезических» кривых постоянного уровня) значений функции качества ρ , определяемой по (4). Также красным цветом показана кривая с круглыми «маркерами», на которой достигается оптимальное соответствие размера ансамбля и скорости движения абонентов. Фактически указанная зависимость определяет решение поставленной задачи.

Разные варианты, представленные на рис. 1, а и б, рис. 2, а и б, соответствуют различным значениям ОСШ $z_0 = 10$ и 25 дБ. Как видно, поверхности функции качества ρ имеют вид «седла». Особая точка на всех кривых соответствует ансамблю N_0 на уровне среза $\rho = 1$. Полученные результаты можно интерпретировать, как определение точки игры [3, 4], в которой стратегия одного

Рисунок 1

Оценка эффективности размера ансамбля OFDM-сигнала для LTE1800

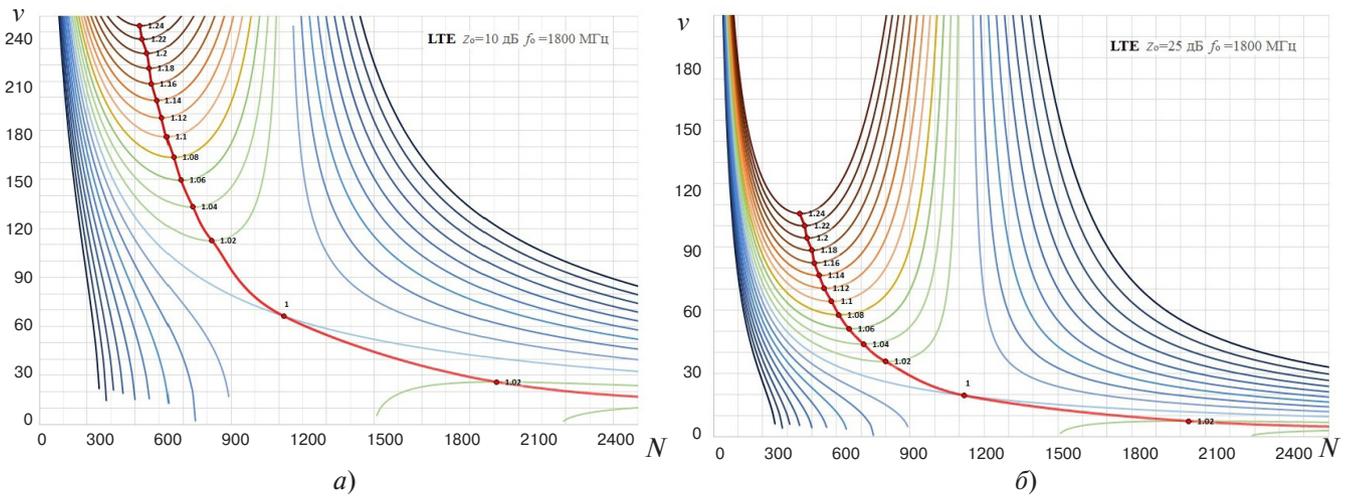


Рисунок 2

Оценка эффективности размера ансамбля OFDM-сигнала для McWILL в диапазоне 1800 МГц

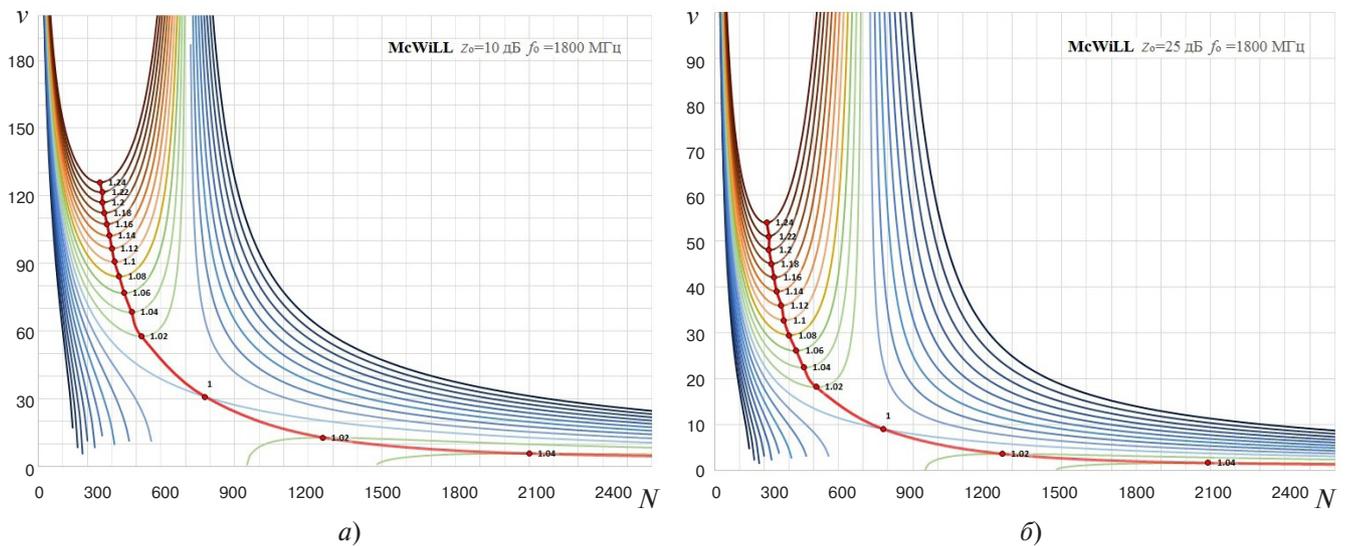


Рисунок 3

Оценка эффективности размера ансамбля OFDM-сигнала для LTE2600

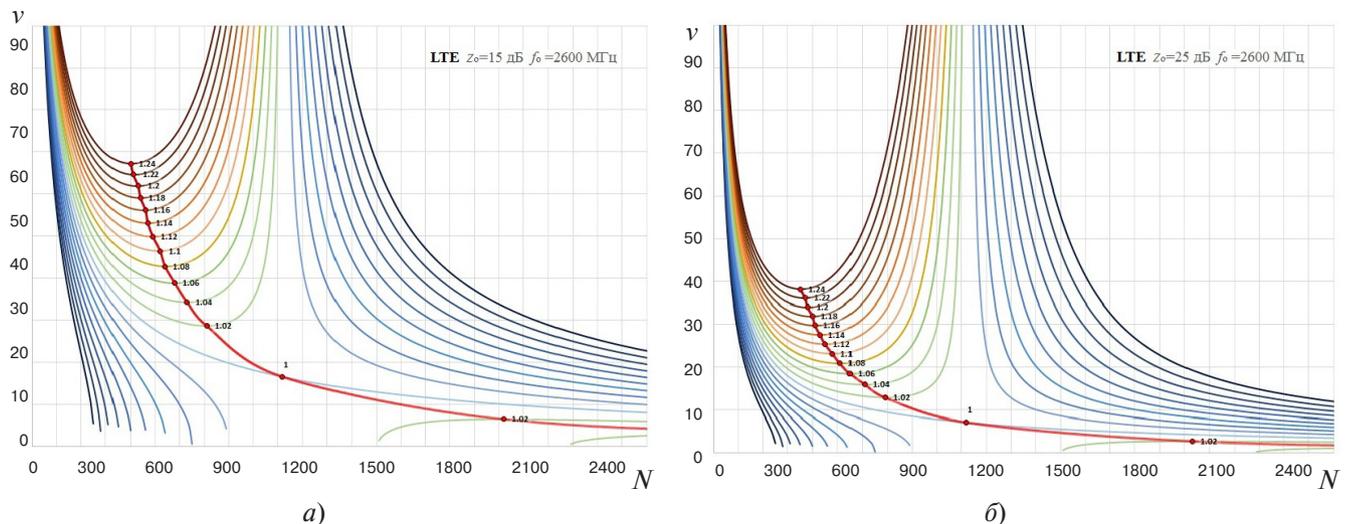


Рисунок 4

Оценка эффективности размера ансамбля OFDM-сигнала для McWILL в диапазоне 340 МГц

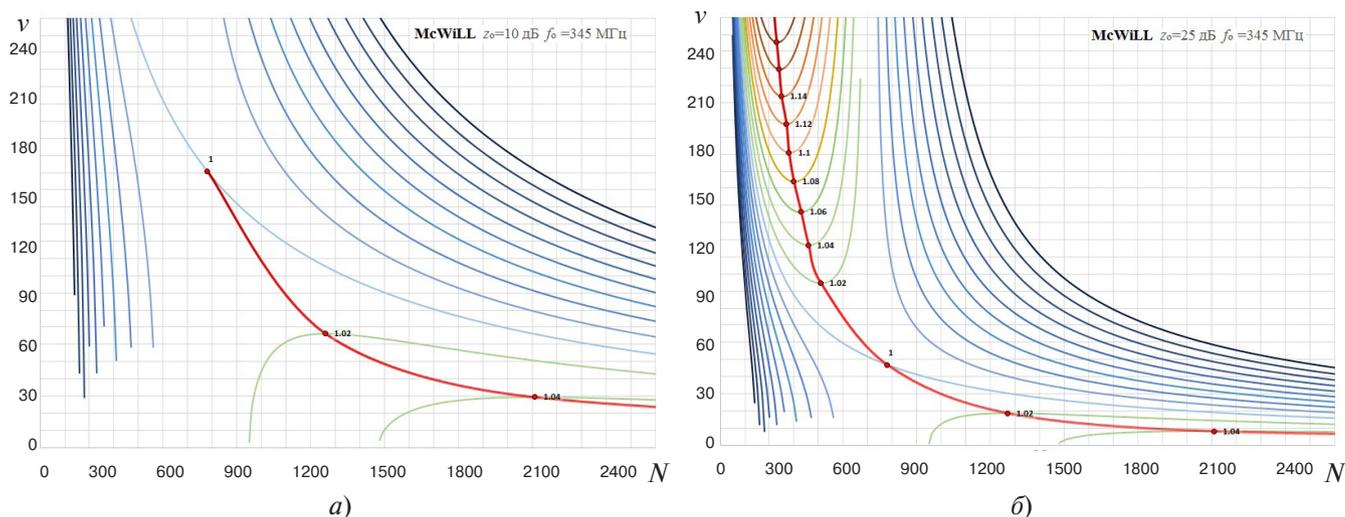
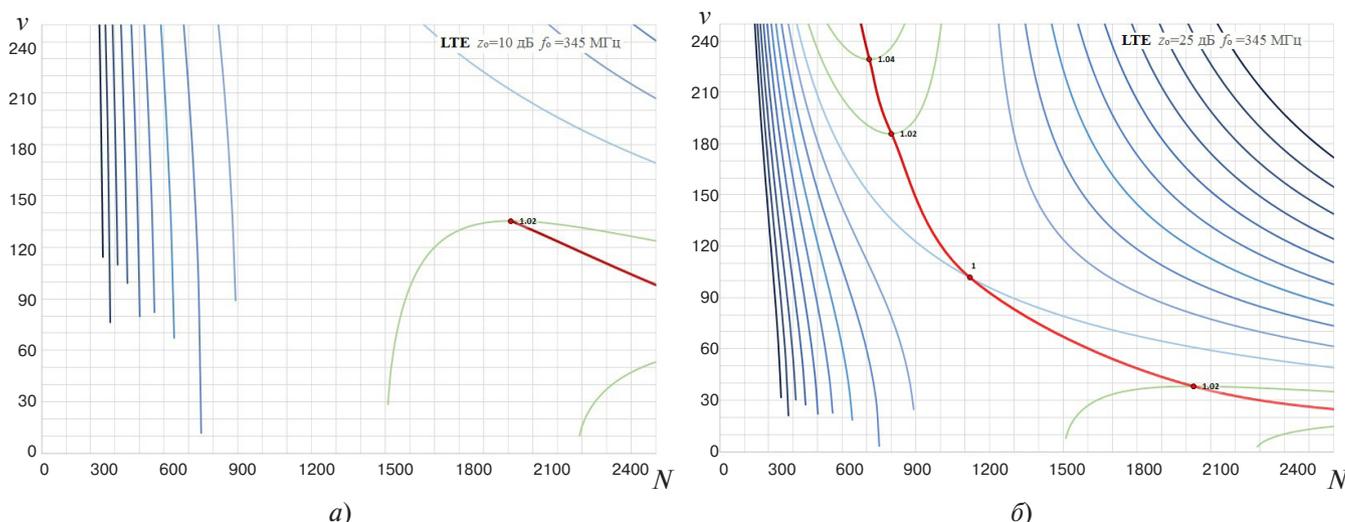


Рисунок 5

Оценка эффективности размера ансамбля OFDM-сигнала для LTE в диапазоне 340 МГц



игрока состоит в выборе размера ансамбля поднесущих N , а другого — скорости движения v . При этом значения скорости «седловых» точек определяют на какую скорость абонентов лучше всего настроен (с точки зрения игровой интерпретации) используемый сигнал OFDM. Например, если обратиться к рис. 2, б, то можно видеть, что при $z_0 = 25$ дБ (один из наиболее характерных уровней) структура сигналов, используемых в LTE 1800, наилучшим образом сочетается со скоростями перемещения абонентов порядка 20 м/с.

Для сети McWILL при тех же условиях сигнал лучше сочетается со скоростями порядка 10 м/с. При этом потери в эффективности остаются умеренными (порядка 2%), если скорость движения абонентов в сети LTE увеличится до 36 м/с, а в сети McWILL — до 18 м/с. Отсюда следует, что в городских условиях движение абонентов не будет заметно влиять на показатели ЭМС, установленные в [6, 7].

С ростом ОСШ оптимальные скорости снижаются, и эффект от уменьшения размера ансамбля может оказаться значительным. В целом, сопоставляя ширину «геодезических» срезов на рис. 1 и 2, можно заключить, что сеть McWILL обладает большей чувствительностью к настройке размера ансамбля. Объясняется это тем, что для сети McWILL базовый размер ансамбля составляет 640 (соответствует полосе 5 МГц), а LTE — 1024 (15 МГц). Поэтому ширина срезов для LTE примерно в 1,5 раза ($\sim 1024/640$) больше, чем для McWILL. А в относительном представлении срезы имеют примерно одинаковые размеры.

Крутизна подъема оптимальной кривой для McWILL примерно в 2 раза больше, чем у LTE. Это объясняется тем, что частотный разнос поднесущих Δf в McWILL составляет 7,8125 кГц, а в LTE — 15 кГц, что приблизительно в 2 раза больше. Поэтому чувствительность к доплеровским сдвигам в LTE в 2 раза ниже. Но этот

положительный эффект нивелируется тем, что диапазон 1800 МГц не является на территории РФ базовым для LTE. Основной ресурс выделен в полосе 2600 МГц, в которой характер поведения показателя ρ заметно меняется.

На рис. 3 приведены результаты оценки эффективности использования ансамблей поднесущих разного размера для сети LTE, работающей в диапазоне 2600 МГц. Как можно видеть, повышение рабочей частоты приводит к тому, что расчетная скорость движения, на работу с которой согласована сеть, резко уменьшается. Для ОСШ = 25 дБ оптимальной оказывается скорость $v = 7$ м/с. При движениях со скоростями выше 35 м/с потери могут составить до 22% и более. Это существенный уровень деградации. Результаты «драйв-тестов», проведенные во время движения поездов «Сапсан», подтверждают эффект потери сервисов с использованием модуляции QAM64, требующих ОСШ выше 22 дБ, на скоростях более 110–120 км/ч.

Сети стандарта McWILL используют в качестве базовых (помимо диапазона 1800 МГц) диапазоны 340 и 420 МГц. В таком режиме устойчивость к высокоскоростным перемещениям существенно повышается. На рис. 4 показаны результаты оценки эффективности размера ансамбля OFDM-сигнала сети McWILL для рабочего диапазона 340 МГц, на рис. 5 — для гипотетического случая работы сети стандарта LTE в диапазоне 340 МГц. Сопоставляя графики, видим, что в диапазоне 340 МГц стандарт LTE при высоких уровнях ОСШ будет лучше согласован на работу при скоростях абонентов от 40 до 190 м/с, а McWILL — от 20 до 95 м/с. Для современных средств передвижения диапазон скоростей, соответствующий стандарту LTE, завышен. Поэтому эффективность использования ресурса радиоканала будет примерно на 2–4% ниже потенциальной.

Для McWILL размер ансамбля достаточно хорошо согласован со скоростями средств передвижения абонентов. В результате ресурс радиоканала может быть использован практически на 100%. Для сервисов, применяющих простой вид модуляции (QPSK) и требующих невысокого ОСШ, использование LTE в диапазоне 340 МГц (рис. 5, а) приводит к существенному завышению расчетной скорости перемещения над уровнем реальных скоростей мобильных абонентов.

Влияние динамического поведения абонентов на производительность работы канала оказалось довольно заметным. Можно заключить, что этот эффект будет сказываться и на других важных показателях. Поэтому представляется полезным провести дальнейшие исследования и определить вид соответствующих модификаций для таких важных алгоритмов как: оптимальное управление числом каналов в режиме MIMO [8], оптимизированные правила распределения ресурса между абонентами сети McWILL [9], адаптивные алгоритмы

пространственной селекции/пеленгации направлений [10–12] и алгоритмы синхронного кодового разделения [14–16], полученные для условий квазистационарного поведения.

ВЫВОДЫ

1. Приведенные результаты показывают, что применяемый в стандарте McWILL размер ансамбля поднесущих OFDM-сигнала достаточно близок к оптимальному при скоростях перемещения на автомобиле около: 60 км/ч — в городе и 80–100 км/ч — вне города.
2. Размер ансамбля OFDM-сигналов в стандарте LTE для диапазона 2600 МГц существенно завышен. Поэтому при больших скоростях движения (более 110 км/ч) будет наблюдаться заметная деградация производительности канала (более 20%). Особенно сильно она скажется на сервисах, требующих сложных видов модуляции (QAM64). Отмеченное явление подтверждено на практике в поездах «Сапсан».
3. В диапазоне 1800 МГц оценка эффективности используемых в стандартах LTE и McWILL размеров ансамблей OFDM-сигналов показала сопоставимые результаты. Некоторое преимущество LTE наблюдается за счет большого частотного разнесения поднесущих, снижающего негативный эффект от явления Доплера. Одновременно с этим из-за большего разнесения поднесущих в LTE увеличивается отношение защитного интервала к длительности такта OFDM, приводящее к снижению показателя эффективности использования ресурса. Указанные явления в значительной степени компенсируют друг друга.
4. При работе в базовых диапазонах 345 и 425 МГц сеть McWILL способна обеспечивать устойчивую работу с самыми сложными видами модуляции при скоростях движений абонентов до 120 м/с (430 км/ч). Работа сетей LTE в диапазонах ниже 700 МГц стандартом не предусмотрена. Но, как показали результаты анализа, при работе в диапазонах 300...400 МГц размер OFDM ансамблей в LTE заметно отличается от оптимального.
5. Работа в диапазоне 2600 МГц сети McWILL при установленной стандартом структуре OFDM-сигнала приведет к заметному недоиспользованию ресурса при движении абонентов. Начиная со средних скоростей движения, скорее всего будет происходить потеря устойчивости работы сервисов, ориентированных на применение сложных видов модуляции. Решить указанную проблему можно путем внедрения в стандартную схему обработки техники мультимодуляционного эквалайзера [17], позволяющего в 2–2,5 раза поднять верхний барьер допустимых скоростей движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шорин О.А., Аверьянов Р.С.** Оценка уровня интерференций для сигналов с OFDM-модуляцией // Электросвязь. – 2015. – № 12. – С. 55–59.
2. **Аверьянов Р.С., Шорин А.О.** Оценка оптимальных параметров OFDM-сигналов с учетом мобильности абонентов // Электросвязь. – 2015. – № 12. – С. 60–65.
3. **Воробьев Н.Н.** Основы теории игр. бескоалиционные игры. – М.: Наука. Главная ред. физ.-мат. лит.-ры, 1984. – 496 с.
4. **Писарук Н.Н.** Введение в теорию игр. – Минск: БГУ, 2015. – 256 с.
5. **Sesia S., Toufik I., Baker M.** LTE – the UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice // John Wiley&Sons, 2011. – 752 p.
6. **Шорин О.А., Бокк Г.О.** Анализ электромагнитной совместимости стандартов четвертого поколения // Первая миля. – 2016. – № 1. – С. 44–52.
7. **Шорин О.А., Бокк Г.О., Сухацкий С.В.** Методы улучшения межсистемной ЭМС для систем мобильной связи четвертого поколения // Электросвязь. – 2016. – № 2. – С. 35–41.
8. **Бокк Г.О.** МИМО: оптимизация управления числом логических каналов // Электросвязь. – 2017. – № 1. – С. 40–44.
9. **Аверьянов Р.С., Бокк Г.О., Шорин А.О.** Оптимизация размера кольцевой антенны и правила формирования территориальных кластеров для сотовой сети McWILL // Электросвязь. – 2017. – № 1. – С. 22–27.
10. **Бокк Г.О.** Повышение эффективности работы систем связи на основе пространственно-временной обработки и спектрального анализа сигналов: Диссертация на соискание ученой степени д.т.н.: 05.12.17. – Москва, 2000. – 396 с.
11. **Шорин О.А., Щучкин В.М.** Использование интеллектуальных антенн в системах мобильной связи для снижения перегрузок // Труды МАИ. – 2012. – № 53. – С. 19.
12. **Шорин О.А., Токарь Р.С.** Алгоритм синтеза сотовых систем связи 2G // Спецтехника и связь. – 2008. – № 1. – С. 58–63.
13. **Бокк Г.О., Шорин О.А., Шорин А.О., Аверьянов Р.С.** Оптимизация геометрии адаптивной антенны для сотовой сети с OFDM сигналами // Экономика и качество систем связи. – 2016. – № 2. – С. 60–67.
14. **Горгадзе С.Ф.** Повышение эффективности спутниковых радиосистем при использовании синхронного кодового разделения шумоподобных сложных сигналов: Диссертация на соискание ученой степени д.т.н.: 05.12.13. – Москва, 2002. – 350 с.
15. Патент № 2221330 РФ. Широкополосная система радиосвязи КВ-диапазона / О.Ф. Бокк, С.С. Аджемов, В.А. Маковий, Г.О. Бокк. Заявлено 10.01.2002. Опубл. 10.01.2004, Бюл. № 1. – С. 906.
16. Патент № 2209511 РФ. Широкополосная система радиосвязи КВ диапазона / О.Ф. Бокк, В.А. Маковий, С.С. Аджемов, Г.О. Бокк. Заявлено 30.07.2001. Опубл. 27.07.2003, Бюл. № 21. – С. 629.
17. **Шорин О.А., Бокк Г.О.** Эквалайзер для коррекции мультидоплеровских искажений OFDM-сигналов в сетях LTE и McWILL // Электросвязь. – 2017. – № 1. – С. 28–34.

Получено 28.12.16

Особенности планирования сети McWILL с учетом электромагнитной совместимости с сетями LTE в смежных диапазонах частот

О.А. Шорин, генеральный директор ООО «НСТТ», профессор, д.т.н.; oshorin@gmail.com
Г.О. Бокк, директор по науке ООО «НСТТ», д.т.н.; bokkg@yandex.ru

УДК 621.396

Аннотация. Отмечается негативный эффект для сетей широкополосной транкинговой связи от применения методики распределения спектра, построенной на базе одной частотной селекции. Рассмотрена технология частотно-территориально-углового разнесения для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) между сетями McWILL 1800 и LTE 1800. Предложена методика оценки роста сложности проектирования при требовании обеспечения ЭМС. Для сети McWILL 1800 она показала, что сложность возрастет не более чем в 1,5.

Ключевые слова: сети мобильной связи, модель распространения, ЭМС, диапазон 1800 МГц, LTE, McWILL.

ВВЕДЕНИЕ

Задача планирования сетей широкополосной транкинговой связи (ШТС) [1] на современном этапе заметно усложнилась. В доступных рабочих диапазонах уже существуют обширные сегменты развернутых сетей общего пользования. Поэтому кроме решения самой задачи планирования необходимо еще обеспечивать

ЭМС с указанными сегментами. Регулятор, учитывая то, что в сотовых сетях общего пользования решение задачи максимального повышения емкости предполагает сверхплотное расположение сайтов и что доминирующие операторы будут часто располагать сайты на общих площадках, принял для всех сетей 4G единую методику