

УДК 654.165

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ КАНАЛА ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ФЕМТО-МАКРОСОТ В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ С ПЛОТНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

Н. Ш. Блаунштейн,

доктор физ.-мат. наук, профессор
университет им. Бен-Гуриона в Негеве

М. Б. Сергеев,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассматриваются вопросы совместного использования базовых станций макросети и точек доступа фемто-сети или домашних базовых станций с распределением общих или выделенных несущих частот. Приведены результаты моделирования структуры для анализа улучшения пропускной способности канала в сложной городской среде. Представлен анализ неоднородной сети, состоящей из выделенных фемтосот для домашнего радиопокрытия в присутствии традиционного радиопокрытия макросот. Рассматриваются достоинства и недостатки различных вариантов размещения фемтосот на основе предложенного моделирования структуры сети.

Ключевые слова — беспроводные сети 4G, пропускная способность канала, фемтосота, фемтосеть.

Введение

В последнее десятилетие быстро развивается мобильная широкополосная связь. Первый опыт мобильной широкополосной связи позволяет сегодня использовать коммерчески доступные технологии третьего поколения (3G), такие как CDMA 2000/EV-DO и WCDMA/HSPA, в то время как технологии нового поколения (4G), такие как LTE и WiMAX, продолжают внедряться все большим количеством операторов по всему миру. Это, как ожидается, скоро приведет к их предоставлению мобильным пользователям [1–22].

Растущий спрос на беспроводные мобильные коммуникации требует определения и полного осмысления ограничений пропускной способности каждой технологии, поскольку эти ограничения определяют максимальную скорость передачи данных, вычисляемую с помощью уравнения, впервые предложенного Шенноном [2].

Один из прямых способов «преодоления» фундаментальных ограничений и увеличения скорости передачи данных через канал связи заключается в минимизации расстояния между передатчиком и приемником. Это улучшает качество канала, например соотношение сигнал/шум. Однако для такого метода требуется как можно мень-

ший радиус зоны сотовой связи, а подобное уменьшение может привести к большим частотным помехам между передающими станциями, особенно при применении схемы с повторным использованием одной частоты.

Недавно промышленность заинтересовалась точками доступа фемтосотовой сети (FAPs) благодаря их огромному потенциалу увеличения пропускной способности посредством обеспечения маленького радиуса зоны покрытия [1] при сохранении использования базовых макростанций (MBS) со стандартными радиусами сотовой связи.

Технологии фемтосот были признаны органами по стандартизации на форумах 3GPP, 3GPP2 и WiMAX самыми высококлассными во всем мире. Достоинства FAP:

- 1) увеличение зоны покрытия внутри помещений;
- 2) более длительная работа аккумулятора подвижного абонента (MS) из-за уменьшения расстояния между приемником и передатчиком;
- 3) дополнительные виды обслуживания, связанные с расположением FAPs вблизи MS домо-владельца;
- 4) экономия на капитальных расходах в сетях макросот/микросот.

Однако соседство FAP с другими FAPs и макросотовыми базовыми станциями (BS) остается ключевой проблемой, которую необходимо решить [3, 4].

В данной работе проводится анализ сосуществования и исследуется вариант размещения FAP в присутствии помех MBS и взаимных помех между FAPs. Последний многообещающий сценарий изучен в работах [3, 4], где были рассмотрены взаимные помехи FAPs. Более того, в работе [3] предложен алгоритм оптимизации пространственного заполнения для OFDM-системы, а в работе [4] приведен сценарий с совместными MBS-FAP помехами, демонстрирующий, что в связи основные помехи создаются MBSs.

Анализ пропускной способности представлен в виде разницы пропускных способностей канала между различными вариантами размещения FAPs. Принимая во внимание различные стратегии размещения, при анализе пропускной способности будем основываться на формулировке четырех главных определений:

- 1) распределение выделенного спектра (DSA) — FAP использует выделенный диапазон, который не используется в макросетях;
- 2) распределение общего спектра (SSA) — FAP использует те же частоты, что и макросеть;
- 3) закрытая абонентская группа (CSG) — FAP доступен лишь для локальной группы пользователей, находящихся внутри помещения, в соответствии с установленным списком доступа;
- 4) открытая абонентская группа (OSG) — все MSs имеют доступ к обслуживанию FAP.

В данной статье проанализированы все комбинации: DSA с CSG и с OSG, а также SSA с CSG и с OSG. Размещение общего и выделенного каналов было проанализировано в работах [4–8, 14–15], сравнение закрытых и открытых групп доступа проведено в работах [5–6, 14], а различных методов регулирования мощности — в работах [7, 16].

Новизна предложенного анализа вытекает из формулировки всех возможных сценариев в городских условиях, включая следующие модели распространения: «улица—помещение», «помещение—улица» и «помещение—помещение».

Модели распространения

Модель распространения на улице

Предложен многопараметрический вероятностный подход для прогнозирования мощности сигнала в городской среде. Данный подход [23–27] базируется на многолучевом распространении вдоль прямых пересекающихся улиц, территорий, окруженных улицами, и иных естественных или созданных человеком преград, распределенных случайным образом (по закону Пуассона

на как ординарный поток рассеивателей) на пересеченной местности.

Общие формулы для прогнозирования потерь в радиоканале при различных сценариях с разными высотами BS и абонентских антенн получены в работах [23–27]. Здесь предлагается упрощенный подход [27] с многократной дифракцией и рассеиванием для когерентных и некогерентных составляющих интенсивности сигнала, приведенный к простой форме уравнений «прямой линии», как это обычно предлагают другие авторы [28–31].

В зависимости от высоты размещения антенны BS с учетом высоты крыш зданий и антенны MS существует несколько вариантов для застроенной местности [27]. Нами рассматривается наиболее общий сценарий с максимально типизированными условиями распространения радиоволн для реальной городской среды: антенна BS находится выше крыш зданий или на их уровне, MS-пользователь находится ниже уровня крыш, присутствуют многократное рассеяние и однократная или многократная дифракция от крыш.

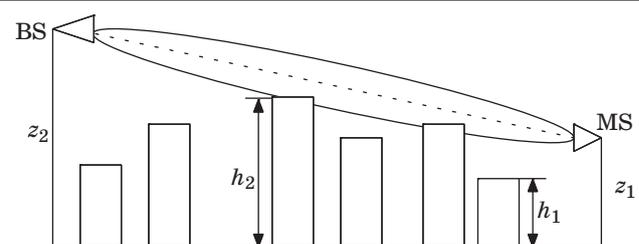
В первом сценарии (рис. 1) в условиях не прямой видимости (NLOS) дифракция от крыш, расположенных рядом с антенной MS, является источником затенения и медленного фединга сигнала. Используя результаты из работы [26], получаем

$$L(r) = -32,4 - 30 \log f - 30 \log r - L_{\text{fading}}, \quad (1)$$

где f — частота, МГц; r — расстояние между BS-и MS-антеннами, км; в конкретном случае

$$L_{\text{fading}} = 10 \log \frac{\gamma_0 l_v F^2(z_1, z_2)}{|\Gamma| \left[\frac{\lambda r}{4\pi^3} + (z_2 - \bar{h})^2 \right]^{1/2}}. \quad (2)$$

Здесь $\gamma_0 = 2\bar{L}v/\pi$ — плотность контуров застройки, км^{-1} ; \bar{L} — средняя длина здания, км; v — количество зданий на квадратный километр; параметр l_v — шероховатость стены, как правило, размером от 1 до 3 м; z_1 и z_2 — высота антенн MS и BS соответственно; $|\Gamma|$ — абсолютное значение коэффициента отражения. В этой ситуации функция профиля застройки может быть представлена в следующем виде [27]:



■ Рис. 1. Условия Quasi-LOS: ряд зданий создают помехи радиотрасе

$$F(z_1, z_2) = \begin{cases} (h_1 - z_1) + \frac{\Delta h}{n+1}, & h_1 > z_1, z_2 > h_2 > z_1 \\ \frac{(h_2 - z_1)^{n+1}}{(n+1)(\Delta h)^{n+1}}, & h_1 < z_1, z_2 > h_2 > z_1 \end{cases}, \quad (3)$$

где h_1 и h_2 — соответственно минимальная и максимальная высота зданий в застроенной местности, м.

Абсолютные значения коэффициента отражения $|\Gamma|$ для различных материалов следующие [28, 30]: стекло — 0,4; древесина — 0,5–0,6; камень — 0,7–0,8; бетон — 0,9.

Длины радиоволн в сотовой связи, λ , лежат в широком диапазоне от 0,05 до 0,3 м и охватывают большинство современных беспроводных сетей. Уравнения (1) и (2) можно использовать для определения потенциала канала связи для различных ситуаций в застроенной местности, а также для высоко поднятых антенн BS по отношению к профилю зданий.

В случае *второго сценария* (рис. 2) дифракции от крыш зданий, расположенных недалеко от антенн MS и BS, являются источниками затенения и медленного фединга сигнала. Здесь мы получаем, согласно результатам из работы [27]:

$$L(r) = -41,3 - 30 \log f - 30 \log r - L_{\text{fading}}, \quad (4)$$

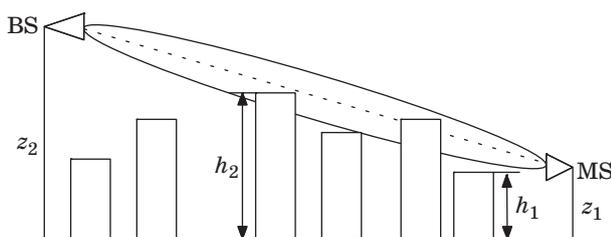
где

$$L_{\text{fading}} = 10 \log \frac{\gamma_0^4 l_v^3 F^4(z_1, z_2)}{\lambda |\Gamma|^2 \left[\frac{\lambda r}{4\pi^3} + (z_2 - \bar{h})^2 \right]}. \quad (5)$$

Отсюда функция профиля застройки может быть представлена в следующем виде [27]:

$$F(z_1, z_2) = \begin{cases} (h_1 - z_1) + \frac{(\Delta h)^2 - (h_2 - z_2)^2}{2\Delta h}, & h_1 > z_2, h_2 > h_1 > z_1 \\ \frac{(h_2 - z_1)^2 - (h_2 - z_2)^2}{2(\Delta h)}, & h_1 < z_2, h_2 > h_1 > z_1 \end{cases}. \quad (6)$$

Как и в первом сценарии, уравнения (4)–(6) можно использовать для определения потенциала



■ Рис. 2. Условия NLOS с учетом влияния крыш многочисленных зданий

канала связи при различных вариантах размещения в застроенной местности, в том числе и для антенн BS и MS, расположенных ниже крыш.

Модель распространения в помещении

Для модели распространения радиоволн в помещении коэффициент затухания получен в работах [32, 33]. Тот же подход был использован для численных расчетов:

$$L(r) = -L(r_0) - 10n_{\text{sf}} \log \left(\frac{r}{r_0} \right) - \sum PAF - FAF, \quad (7)$$

где n_{sf} — значение коэффициента затухания; PAF — коэффициент затухания в перегородках, вызванного преградой между FAP и MS, дБ; FAF — коэффициент затухания в межэтажных перекрытиях, дБ.

Значения были получены для окружающей обстановки на местности в ходе численного моделирования с учетом полосы частот и соответствующих эмпирических результатов [32, 33].

Модели пропускной способности канала

Чтобы проанализировать потенциальную пропускную способность канала пользователей мобильных сетей с интегрированными в них фемтосотами, в этом разделе представлены уравнения Шеннона, учитывающие различные виды FAPs, доступные конфигурации (CSG, OSG) и распределение каналов (DSA, SSA).

Сделаем следующие допущения для модели пропускной способности канала:

1) общий спектр B_t задается для FAP и MBS в соответствии с рассматриваемой конфигурацией (DSA, SSA, CSG или OSG);

2) все пользователи получают одинаковую пропускную способность, которая задается в соответствии с максимально возможным спросом на обслуживание в сети, т. е. каждый MS получает эквивалентную часть B_t ;

3) все FAPs и MBSs передают одновременно для всех активных пользователей;

4) объединенные модели распространения из работы [27] и данной статьи для случаев «с улицы — в помещение», «из помещения — на улицу», «из помещения — в помещение» использованы для расчета средней мощности принимаемого сигнала с учетом сильного и слабого затуханий и дополнительных характеристик распространения, таких как многократное рассеяние, дифракция и поглощение.

А. Общее значение спектра для закрытой абонентской группы

В этом случае полоса пропускания общего спектра делится между сетью FAPs и MBSs; ем-

кость для пользователя MS, i_F , для покрытия FAP может быть представлена следующим образом:

$$C_{SSA_CSG_indoor_i} = B_{tN} \log_2 \left(1 + \frac{S_{F_i}}{kTB_{tN} + \sum_{j=1, j \neq i}^J I_j + \sum_{l=1}^L I_l} \right), \quad (8)$$

где $B_{tN} = B_t / N$ — полоса пропускания, приведенная к числу пользователей N , обслуживаемых FAP; S_{F_i} — мощность сигнала FAP в месте, где находится MS-пользователь i_F , обслуживаемый FAP с $i_F \in (1:N)$; kTB_{tN} — тепловой шум, где k — коэффициент Больцмана, а T — температура, К; I_j — величина помех от соседних FAPs с номерами $j \in (1:J)$, где J — общее количество FAPs; I_l — величина помех MBSs с номерами $l \in (1:L)$, где L — общее количество MBSs.

Отметим, что пользователи MS, которые находились в помещениях, считаются зарегистрированными в CSG, в противном случае они не могут обслуживаться FAP.

Емкость для MS-пользователя на улице, i_M , может быть рассчитана следующим образом:

$$C_{SSA_CSG_outdoor_i} = B_{tP} \log_2 \left(1 + \frac{S_{M_i}}{kTB_{tP} + \sum_{j=1}^J I_j + \sum_{l=1, l \neq i}^L I_l} \right), \quad (9)$$

где $B_{tP} = B_t / P$ — полоса пропускания, приведенная к числу пользователей P , обслуживаемых MBS; S_{M_i} — мощность сигнала MBS в месте, где находится MS-пользователь i_M , обслуживаемый FAP с $i_M \in (1:P)$.

Б. Общее значение спектра для открытой абонентской группы

Главное отличие в данном случае заключается в том, что MS-пользователи, которые находятся на улице, потенциально могут обслуживаться FAP. Таким образом, для MS-пользователей i_{FO} , которые обслуживаются FAP и находятся на улице, пропускную способность канала связи можно записать в виде

$$C_{SSA_OSG_outdoor_iF} = B_{tN} \log_2 \left(1 + \frac{S_{F_i}}{kTB_{tN} + \sum_{j=1}^J I_j + \sum_{l=1, l \neq i}^L I_l} \right). \quad (10)$$

Отметим, что решение по обслуживанию пользователя MS на улице с помощью FAP или MBS было принято путем простого переключения каналов, т. е. передатчик (FAP или MBS) с наибольшей мощностью сигнала обслуживает MS.

В. Значение выделенного спектра для закрытой абонентской группы

В случае выбора выделенного спектра в сети фемтосот не наблюдается взаимных помех между MBS и FAP, однако общая полоса пропускания B_t делится между сетями FAP и MBS каким-либо способом (см. разд. «Результаты численных расчетов»). Очевидно, что распределение может быть несимметричным, поэтому емкость канала для пользователя MS i_F в сети FAP может быть представлена следующим образом:

$$C_{DSA_CSG_indoor_i} = B_{tNd} \log_2 \left(1 + \frac{S_{F_i}}{kTB_{tNd} + \sum_{j=1, j \neq i}^J I_j} \right), \quad (11)$$

где $B_{tNd} = B_t \cdot FNR / N$; FNR — соотношение сети FAP, определяющее часть от общего спектра B_t , распределенной для сети FAP.

Емкость для MS-пользователя i_M на улице, который обслуживается MBS, рассчитывается следующим образом:

$$C_{DSA_CSG_outdoor_i} = B_{tPd} \log_2 \left(1 + \frac{S_{M_i}}{kTB_{tPd} + \sum_{l=1, l \neq i}^L I_l} \right), \quad (12)$$

где $B_{tPd} = B_t \cdot FNR / P$.

Г. Значение выделенного спектра для открытой абонентской группы

При сравнении OSG с CSG емкость для MS-пользователя на улице, которая достаточно покрыта FAP (большая мощность сигнала), может быть рассчитана следующим образом:

$$C_{DSA_OSG_outdoor_iF} = B_{tNd} \log_2 \left(1 + \frac{S_{F_i}}{kTB_{tNd} + \sum_{j=1}^J I_j} \right), \quad (13)$$

где $B_{tNd} = B_t \cdot FNR / N$.

Пространственное заполнение

Для решения задачи оптимального распределения ресурсов в определенной области сервиса предлагается подход пространственного заполнения [34]. Рассмотрим $B_l = \{b_m^l, m = 1, \dots, M\}$ — набор случайно распределенных фемтостанций в l -й городской макросети. Предполагается, что каждая фемтостанция имеет свое ограничение мощности $\bar{P}_m^l, \forall m = 1, \dots, M$, а общая мощность всей системы фемтостанций, доступная в рамках макроэлемента, равна $P_{total}^l = \sum_{m=1}^M \bar{P}_m^l$.

Здесь рассматривается проблема оптимального распределения мощности среди беспорядочно действующих фемтостанций в B_l , в присутствии передачи \tilde{P}_l макростанции, которая максимизирует общую (сетевую) пропускную способность канала. Следует учесть, что при работе в географической близости фемтостанции создают друг другу помехи. Эти помехи и шум от m -й фемтостанции $b_m^l \in B_l$ можно записать следующим образом:

$$I_m^l = \tilde{R}_m^l + \sum_{m' \neq m, m'=1}^M R_{m'm}^l + n_m^l, \quad (14)$$

где $R_{m'm}^l$ — полученная мощность от передачи l -й макростанции и m' -й фемтостанции соответственно; $\{n_m^l, m = 1, \dots, M\}$ — шум приемника. Рассматриваемая здесь проблема может быть смоделирована как параллельный канал помех, в котором помехи каждой передающей фемтостанции создает другая фемтостанция в рамках выбранной макросети. Рассматриваемая проблема оптимизации может быть сформулирована следующим образом:

$$\max_{\mathbf{p}_l} \left\{ \sum_m C_m^l(\mathbf{p}_l, \tilde{P}_l) \right\},$$

$$\sum_{m=1}^M P_m^l \leq P_{total}^l, \bar{P}_m^l \geq P_m^l \geq 0, \forall m, \quad (15)$$

где $\mathbf{p}_l = [P_1^l, \dots, P_M^l]$ — мощность в стратегии размещения; $C_m^l(\mathbf{p}_l, \tilde{P}_l)$ — емкость канала в рамках l -й фемтосоты. Проблема оптимизации (15) сложная, поэтому для ее решения предлагается итерационный оптимизационный подход пространственного заполнения, где существует неограниченное проводное встречное включение между фемтосотами и центральным узлом [34].

Для инициализации предлагаемого подхода будем считать, что все фемтостанции передают

данные с некоторым фиксированным заданным значением мощности (подходит для всех станций при рассмотрении различных производителей фемтостанций).

В течение первого заданного временного интервала каждая фемтостанция получает канал согласно условию (15). Следует обратить внимание на то, что процесс этот может выполняться синхронно или асинхронно. На втором этапе полученная полная информация о состоянии канала отправляется в центральный узел с помощью проводного встречного включения. На третьем этапе центральный узел выполняет пространственное заполнение и принимает решение о целевой мощности v_l , которая оптимизирует общую емкость сети. Наконец, на четвертом этапе эта целевая мощность v_l подается на каждую фемтосоту сети, и каждая фемтостанция регулирует свою мощность в соответствии с нижеследующим условием:

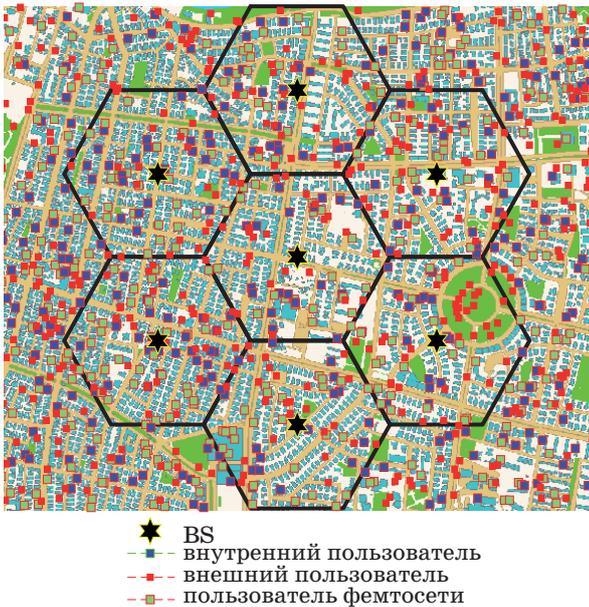
$$P_m^l = \max \left\{ (v_l - I_m^l)^+, \bar{P}_m^l \right\}, \forall m = 1, \dots, M, \quad (16)$$

где $(\cdot)^+$ — положительная часть аргумента. Процесс пространственного распределения выполняет цикл из четырех стадий предлагаемого подхода до тех пор, пока не будет достигнуто сближение пространственного распределения мощности. Обращаем внимание на то, что предлагаемый метод распределения мощности является субоптимальным из-за приближенного значения мощности к значению оптимального решения, полученного с помощью подхода итерационного заполнения, а также в связи с тем, что для оптимального распределения мощности может потребоваться передаваемая мощность $(v_l - I_m^l)^+$, большая, чем максимально доступная мощность \bar{P}_m^l .

В условиях плотной городской застройки с большим количеством фемтосетей предлагаемый подход соответствует оптимальной пропускной способности сети. Кроме того, обращаем внимание на вычислительную сложность предлагаемого подхода распределения мощности. В заключение отметим, что предлагаемая процедура распределения мощности должна выполняться каждый раз, когда к сети подключается новая фемтостанция, или фемтостанция отключается, или происходят любые изменения условий окружающей среды.

Результаты численных расчетов

В данном разделе предлагается численное моделирование для различных типов сетей, когда существует три типа стандартных FAPs с максимальной эквивалентной изотропно-излучаемой мощностью (ЭИИМ) со значениями 10, 15, 21 дБм. Один и тот же анализ проводится после осуществ-



■ Рис. 3. Городская обстановка

ления алгоритма оптимизации мощности с использованием подхода пространственного заполнения, предложенного в работе [34].

Для моделирования реального распределения пользователей в городской среде была создана следующая модель (подобная методу Монте-Карло): образцом городской обстановки (рис. 3) был выбран район Тель-Авива размером $1,5 \times 1,5$ км, в котором равномерно распределены 7 сот. MS-пользователи были равновероятно распределены по сотам в указанном районе, причем часть из них была случайным образом распределена в помещениях, и были смоделированы различные проценты вызовов из помещений — 20, 40, 60 %, а FAPs были равновероятно распределены между пользователями в помещениях.

Моделировались ситуации с различными процентными соотношениями MS-пользователей в помещениях, которые имеют FAPs, а именно 50, 70, 100 %. Моделировалось различное расположение FAPs между MS-пользователями: равномерное, 80 % сосредоточено на границе соты, и 20 % — в центре, и наоборот. Были смоделированы все виды конфигураций FAPs, описанные выше для моделей А — Г. Все исследования проводились в пределах семи центрально расположенных ячеек с предполагаемым повторным использованием частот. Плотность пользователей составляла 480 чел./км².

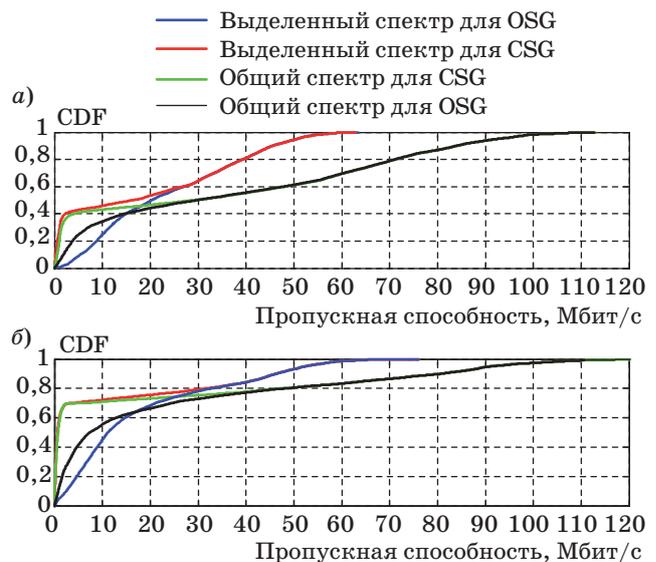
Примерно 40 % пользователей имеют ограниченную пропускную способность (менее 2 Мбит/с); остальные 60 % пользователей (в помещении) имеют более высокую пропускную способность в зависимости от их расстояния до FAPs (рис. 4, а).

Отчетливо видно (рис. 4, а и б), что в случае с OSG MS-пользователи на улице имеют более высокую пропускную способность, чем в случае с CSG. Кроме того, сравнивая общую и выделенную OSG, следует отметить, что для пользователей на улице пропускная способность будет выше при выделенной конфигурации, так как при общей конфигурации наблюдаются взаимные помехи между FAPs и MBS. Однако наибольшая пропускная способность системы для OSG наблюдается в случае с общим спектром OSG. Эти выводы не очевидны в уравнениях (10) и (13) в связи с неопределенностью того, существеннее ли соот-

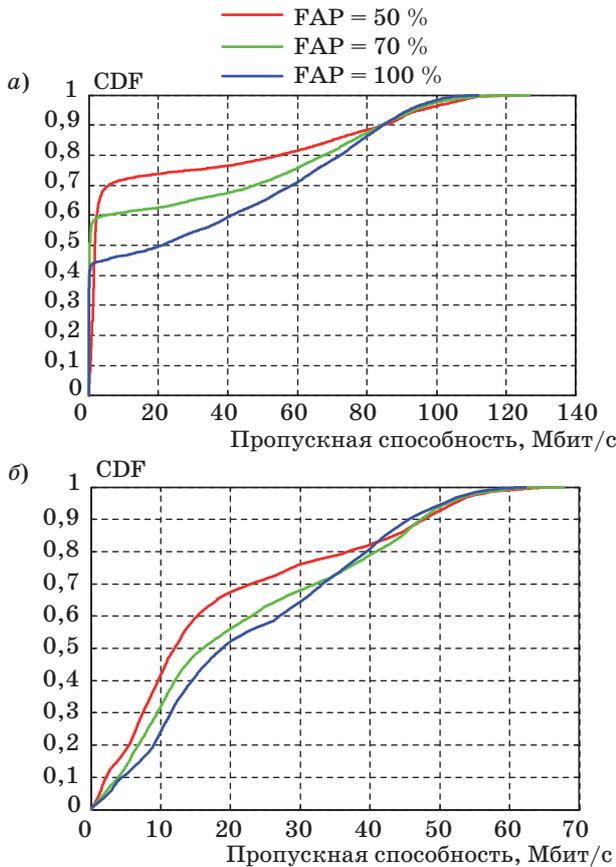
ношение $B_{tN} > B_{tNd}$, чем сумма $\sum_{l=1}^L I_l$ в выражении $\log(.)$. Однако из рис. 4, а и б следует, что если B_{tN} больше B_{tNd} в 2 раза и максимально доступная пропускная способность канала составляет 120 Мбит/с для общего случая против 60 Мбит/с для выделенного спектра, то влияние $B_{tN} > B_{tNd}$ существенно.

Различные степени проникновения FAPs по-разному влияют на производительность системы в целом в плане пропускной способности канала (рис. 5, а и б). Наиболее интересно исследование влияния на показатели производительности дополнительных помех от FAP.

В случае SSA в CSG (рис. 6, а) следует отметить, что для пользователей на улице производительность обратно пропорциональна числу FAPs (модель А) из-за помех FAP, производимых ею от пользователей на улице, пользователям с разрешенным доступом. Дополнительные помехи по-



■ Рис. 4. Вероятность пропускной способности у 40 % абонентов вне зданий и 60 % внутри помещений при ЭИИМ = 21 дБм; проникновение FAP = 100 % (а) и 50 % (б)



■ Рис. 5. Вероятность пропускной способности у 60 % абонентов внутри помещений при ЭИИМ = 15 дБм: а — для закрытой абонентской группы; б — для открытой абонентской группы

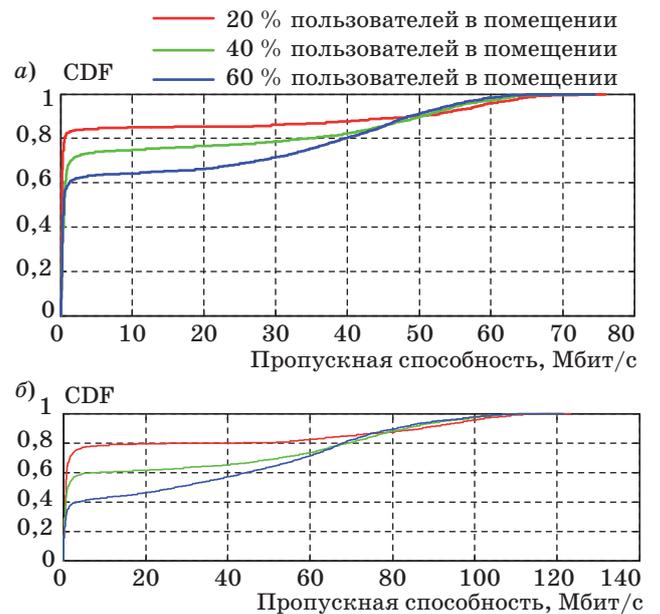
являются у пользователей в помещении, когда один пользователь FAP создает помехи для других пользователей FAP (модель Б).

Этот феномен отражен на рис. 5, а в месте пересечения красной и синей линий при 80 Мбит/с.

В случае DSA в OSG (см. рис. 5, б) FAP не создает помехи для пользователей на улице, т. е. феномен А не наблюдается. Однако феномен Б наблюдается — это пересечение красной и синей линий при 40 Мбит/с.

Проникновение для различных пользователей в помещение и его влияние на производительность системы в целом оцениваются в данном примере для концепции CSG (рис. 6, а и б).

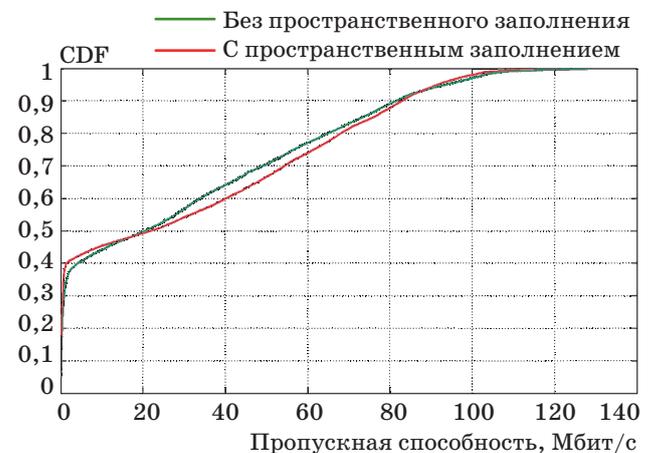
На рис. 6, а и б смоделировано проникновение в помещение 20, 40 и 60 % вместе с проникновением FAP в 70 и 100 %. Смоделирована ЭИИМ 21 дБм. Очевидно, что для любых конкретных условий (уровень проникновения для пользователей в помещение и проникновение FAP) различные варианты расположения фемтосот превосходят другие варианты. Например, для выделенных CSG уровень проникновения 20 % на улице



■ Рис. 6. Вероятность пропускной способности при ЭИИМ = 21 дБм: а — для закрытой абонентской группы, проникновение FAP = 70 %; б — для открытой абонентской группы, проникновение FAP = 100 %

прямо пропорционален пропускной способности канала до тех пор, пока помехи FAP не становятся существенными для пользователей FAP (модель Б). Для общего CSG 20 % проникновения в помещение всегда превосходят 40 и 60 % проникновения в помещение, т. е. модель Б проявляется недостаточно.

Были реализованы две модели для 60 % проникновения в помещение и для 100 % проникновения FAP в общий канал CSG (рис. 7). Очевидно, что для пользователей на улице (в области CDF до 0,4) наблюдается более высокая общая пропуск-



■ Рис. 7. Вероятность пропускной способности для 60 и 100 % проникновения FAP в общий канал CSG

ная способность, а для пользователей в помещении (в этой конфигурации все они — пользователи фемтосоты) мы можем наблюдать, что общая пропускная способность меньше, чем без пространственного заполнения.

И, наконец, наиболее важным результатом является то, что при рассмотрении суммарной пропускной способности для всех пользователей с применением метода пространственного заполнения можно добиться большей общей пропускной способности канала.

Заключение

В случае OSG MS-пользователи на улице получают более высокую пропускную способность, чем в случае CSG.

Сравнивая общую и выделенную OSG, отметим, что для пользователя на улице пропускная способность будет выше при выделенной конфигурации.

Вычисления с применением пространственного заполнения и без него дали похожие результаты, но подход пространственного заполнения дает лучшую пропускную способность канала для макросоединений на улице и пикосоединений в помещении.

Общая пропускная способность увеличивается в случае применения FAP-расширения. В то же время наблюдается и увеличение помех между пользователями.

Авторы благодарят студентов Негевского университета им. Бен-Гуриона Я. Бабиш и Е. Тсаллихина за помощь в численных расчетах.

Литература

1. Chandrasekhar V., Andrews J. G., Gatherer A. Femtocell networks: A survey // IEEE Communications Mag. Sept. 2008. P. 59–67.
2. Shannon C. E. A mathematical theory of communication // Bell System Technical Journal. 1948. Vol. 27. P. 379–423.
3. Holma H., Toskala A. HSDPA/HSUPA for UMTS. — Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2006. P. 130.
4. Mahmoud H., Guvenc I. A comparative study of different deployment models for femtocell networks // Proc. of the IEEE 20th Intern. Symp. of Personal, Indoor, Mobile Radio Communications (PIMRC), Athens, Greece, Sept. 2007. P. 5.
5. FemtoForum. Interference management in UMTS femtocells. — White Paper. Dec. 2008. P. 115. [http://www.femtoforum.org/femto/File/Interference Management in UMTS Femtocells.pdf](http://www.femtoforum.org/femto/File/Interference_Management_in_UMTS_Femtocells.pdf) (дата обращения: 03.05.2012).
6. Mahmoud H., Guvenc I. A Comparative study of different deployment modes for femtocell networks // IEEE. DCOMO Communications Lab., USA, 2009. P. 58.
7. Nihtila T. Capacity Improvement by Employing Femto Cells in a Macro Cell HSDPA Network // IEEE Magister Solutions Ltd., Finland, 2008. P. 838–843.
8. Yeh S. P., Talwar S., Lee S. C., Kim H. WiMAX femtocells: a perspective on network architecture, capacity, and coverage // IEEE Communications Mag. Oct. 2008. Vol. 46. N 10. P. 58–65.
9. Chandrasekhar V., Andrews J. G., Gatherer A. Femtocell networks: a survey // IEEE Communications Mag. Sept. 2008. Vol. 46. N 9. P. 59–67.
10. Perez D. L. et al. Access methods to WiMAX femtocells: A downlink system-level case study // Proc. IEEE Int. Conf. Communications Syst. (ICCS), Guangzhou, China, Nov. 2008. P. 6.
11. Claussen H. Performance of macro- and co-channel femtocells in a hierarchical cell structure // Proc. IEEE Int. Symp. Personal, Indoor, Mobile Radio Communications (PIMRC), Athens, Greece. Sept. 2007. P. 5.
12. Chandrasekhar V., Andrews J.G. Uplink capacity and interference avoidance for two-tier cellular networks // IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM). Washington, DC, Nov. 2007. P. 6.
13. Guvenc I., Jeong M. R., Watanabe F., Inamura H. A hybrid frequency assignment for femtocells and coverage area analysis for co-channel operation // IEEE Communications Lett. Dec. 2008. Vol. 12. N 12. P. 880–882.
14. 3GPP. Physical layer aspects of UTRA high speed downlink packet access // IEEE Standard. Mar. 2001. P. 160.
15. Claussen H. Performance of macro- and co-channel femtocells in a hierarchical cell structure // Proc. of the 18th Intern. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Athens, Greece, Sept. 2007. P. 5.
16. Digital Mobile Radio towards Future Generation Systems / Ed. By E. Damosso, COST 231, Final Report. 1998. P. 312.
17. Ho L. T. W., Claussen H. Effects of user-deployed, co-channel femtocells on the call drop probability in a residential scenario // Proc. of the 18th Intern. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Athens, Greece, Sept. 2007. P. 4.
18. Kovacs I. Z. et al. HSDPA performance in mixed outdoor-indoor micro cell scenarios // Proc. of the 17th Intern. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Helsinki, Finland, Sept. 2006. P. 6.

19. **Nihtila T., Kurjenniemi J., Lampinen M., Ristaniemi T.** Performance of receive diversity and LMMSE chip equalization in WCDMA HSDPA network // *Wireless Personal Communications*. Oct. 2007. N 2(43). P. 261–280.
20. **Mostafa Zaman Chowdhury, Yeong Min Jang, Zygmunt J. Haas** Network evolution and QOS provisioning for integrated femtocell / macrocell networks // *Intern. J. of Wireless & Mobile Networks (IJWMN)*. Aug. 2010. Vol. 2. N 3. P. 216–227.
21. **Yeonjune Jeong et al.** Femtocell frequency planning scheme in cellular networks based on soft frequency reuse // *Proc. of 2010 Int. Conf. On Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discover*. 2010. P. 176–180.
22. **Sundeep Rangan.** Femto-macro cellular interference control with subband scheduling and interference cancelation // *Proc. of IEEE Globecom 2010 Workshop on Femtocell Networks*. 2010. P. 695–700.
23. **Blaunstein N., Levin M.** VHF/UHF wave attenuation in a city with regularly spaced buildings // *Radio Science*. 1996. Vol. 31. N 2. P. 313–323.
24. **Blaunstein N.** Prediction of cellular characteristics for various urban environments // *IEEE Anten. Propagat. Mag.* 1999. Vol. 41. N 6. P. 135–145.
25. **Blaunstein N. et al.** Prediction of loss characteristics in built-up areas with various buildings overlay profiles // *IEEE Anten. Propagat. Mag.* 2001. Vol. 43. N 6. P. 181–191.
26. **Katz D., Blaunstein N., Hayakawa M., Kishiki Y. S.** Radio maps design in Tokyo city based on stochastic multi-parametric and deterministic ray tracing approaches // *J. Anten. Propagat. Mag.* Oct. 2009. Vol. 51. N 5. P. 200–208.
27. **Yarkoni N., Blaunstein N., Katz D.** Link budget and radio coverage design for various multipath urban communication links // *Radio Science*. 2007. Vol. 42. P. 412–427.
28. **Bertoni H. L.** *Radio Propagation for Mobile Wireless Systems*. — NJ: Prentice Hall PTR, 2000. P. 258.
29. **Lee W. Y. C.** *Mobile Communication Engineering*. — NY: McGraw Hill, 1985. P. 563.
30. **Blaunstein N., Christodoulou Ch.** *Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Links: Terrestrial, Atmospheric and Ionospheric*. — NJ: Wiley InterScience, 2007. P. 615.
31. **Okumura Y., Ohmori E., Kawano T., Fukuda K.** Field strength and its variability in the VHF and UHF land mobile radio service // *Review Elec. Communications Lab*. 1968. Vol. 16. N 9–10. P. 825–843.
32. **Seidel S. Y., Rappaport T. S.** 914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings // *IEEE Trans. Anten. and Propagat.* 1992. Vol. 40. N 2. P. 207–217.
33. **Rappaport T. S.** *Wireless Communications*. — New Delhi: Prentice Hall, 2007. P. 642.
34. **Tsalolihin E., Bilik I., Blaunstein N., Babich Y.** Channel capacity in mobile broadband heterogenous networks based femto cells // *Proc. of European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP-2012)*, Mar. 26–30, 2012, Prague, Czech Republic. P. 6.