

УДК 654.165

ИЕРАРХИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ФЕМТО/ПИКО/МАКРОСОТ В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ С ПЛОТНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ АБОНЕНТОВ, НАХОДЯЩИХСЯ ВНУТРИ И ВНЕ ПОМЕЩЕНИЯ

Н. Ш. Блаунштейн,

доктор физ.-мат. наук, профессор
Университет Бен-Гуриона, Израиль, г. Беэр Шева

М. Б. Сергеев,

доктор техн. наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Определяется совместное использование базовых станций макросети и точек доступа фемтосети и пикосети или домашних базовых станций с распределением общих или выделенных несущих частот. Представлены результаты моделирования структуры для анализа улучшения пропускной способности канала в сложной городской среде. Проведен анализ неоднородной сети, состоящей из выделенных фемтосот для домашнего покрытия при наличии традиционного покрытия макросот. Изучаются достоинства и недостатки различных вариантов размещения с использованием предложенного моделирования.

Ключевые слова — сети 4G, макросеть, пикосеть, фемтосеть, радиопокрытие, базовая станция.

Введение

Сегодня сотни миллионов людей по всему миру пользуются сотовыми и не сотовыми беспроводными коммуникациями. Это обусловлено безоговорочным удобством совершать звонки и получать аудио- и видеoinформацию в свободное время, получать и отправлять SMS, MMS, бродить по сети Интернет и писать письма в любом месте и в любое время. Мобильные телефоны стали популярными и ежедневно используемыми предметами. В нашу «информационную эру» считают необходимостью иметь доступ к информации на ходу не только бизнесмены, но и каждый обыватель, желающий быть на связи с внешним миром ежесекундно.

Мобильные сети уже прошли через три поколения. Первое поколение сотовых сетей было аналоговым. В сетях второго поколения (2G) для увеличения их пропускной способности и привлечения большего числа абонентов использовались технологии TDMA, FDMA и CDMA. С помощью цифровых технологий оцифрованный голос может быть закодирован и зашифрован. Более того, сети 2G стали более безопасными.

Сети третьего поколения (3G) интегрировали сотовые телефоны в мир Интернета, предостав-

ляя высокоскоростную передачу данных в дополнение к коммутации устройств передачи голоса. Сотовые сети 3G сначала использовались в некоторых странах Азии, Европы и США, а начиная с 2002 года широко распространены во всем мире. К 2009 году стало ясно, что в какой-то момент сети 3G будут перегружены из-за роста широкополосных приложений, таких как потоковые мультимедиа-данные. В отрасли начались поиски технологий оптимизации данных в целях увеличения скорости их передачи и пропускной способности канала, а акцент делался на GoS и C/I. Особенно важной эта задача оказалась для городской и пригородной сред с различной интенсивностью звонков и потоков данных, изменяющихся во времени.

Спрос на услуги мобильного доступа к данным не только сегодня, но и в обозримом будущем будет расти в геометрической прогрессии. Единственный, наиболее понятный способ увеличения пропускной способности сетей на порядок, а именно это потребуется в течение следующего десятилетия, — развитие сетевой инфраструктуры. Однако указанные тенденции требуют принципиально новых подходов для экономически эффективного развития инфраструктур.

Последнее ключевое направление в этой области — покрытие фемтосотами традиционных

микро- и макросетей. Эти небольшие, недорогие, маломощные точки доступа фемтосотовой сети (FAP) могут быть установлены либо конечным пользователем, либо поставщиком услуг и, как правило, занимают разрешенный спектр и имеют IP-соединения (рис. 1).

Оптимизация пропускной способности канала в беспроводных сетях четвертого поколения (4G) стала ключевым вопросом последующего десятилетия. Настоящая работа является попыткой объединить широкий спектр научных точек зрения [1–4], посвященных фемтосотовой связи. Цель — улучшение понимания проблем следующего десятилетия использованием принятых моделей и показателей и предложение ряда инновационных подходов по проектированию и развертыванию сетей беспроводной связи 4G. Эти подходы основаны на передовых технологиях и использовании адаптивных/смарт-антенн, объединенных в MIMO-конфигурации, с применением комбинации стратегий сотового планирования (от макро- до фемтосот), необходимого для удовлетворения растущего спроса на внедрение современных беспроводных систем — наземных, земля-воздух и земля-спутник.

Имеется ряд публикаций [5–9] по реализации макросотовых сетей, особенно в городских и пригородных районах со средней или высокой плотностью пользователей сотовой связи. Однако на сегодня не существует общей модели для прогнозирования распространения сигнала, особенно в помещениях. Всевозможные преграды: мебель, люди, стены различной толщины, окна — могут располагаться в разных местах и оказывать влияние на распространение радиосигнала.

Когда мобильные пользователи находятся в рамках покрытия макроантенны (значение C/I около 20 дБ), то это означает хорошие пропускную способность канала и скорость передачи данных в нем. Но когда мобильные пользователи приближаются к границам сотовой связи, особенно внутри зданий, значение C/I падает до уровня ~3 дБ. Это означает, что оборудование пользователей подвержено существенному влиянию помех и имеет очень низкую скорость приема/передачи данных.



■ Рис. 1. Иерархия фемто/пикосот



■ Рис. 2. Иерархия фемто/макросот

Как отмечалось выше, фемтосоты становятся сегодня все более популярными, а их использование является усовершенствованным решением для пользователей, удаленных от антенн микросот. Фемтосоты создают сигнал, предоставляющий коммуникацию между пользователями фемтосети, выступая при этом мощной помехой для соседних пользователей микросетей и иных фемтосетей. Этот выбор между усовершенствованным сигналом для одних пользователей и возрастающими помехами для других — основная проблема распространения фемтосетей. Важное значение в построении окончательной конфигурации сети, объединенной с фемтосотами, имеет достижение наилучшего соотношения сигнал/шум, которое влияет на предоставление сигнала высокого качества всем пользователям.

В настоящей работе предлагается решение вышеуказанных проблем моделированием канала связи в городских и пригородных условиях при развитии стратегии макросетей, объединенных с фемтосотами и пикосотами (рис. 2). Для макросетей, объединенных с фемтосотами, проанализированы различные сценарии с разной плотностью; цифры взяты с учетом топографии городской местности, в которой были размещены макросоты, с применением экспериментальных данных.

Чтобы оценить преимущества такого объединения фемто/пико/макросот, предлагается мультипараметрическая стохастическая модель для прогнозирования распространения сигнала как внутри, так и снаружи помещения [10–18].

Модели распространения

Механизм распространения электромагнитной волны можно охарактеризовать с помощью явления отражения, дифракции и рассеивания. Модели распространения обычно направлены на прогнозирование средней мощности принимае-

мого сигнала на заданном расстоянии от передатчика, а также на изменчивость уровня сигнала в непосредственной близости от каждого конкретного местоположения пользователя. Вывести эти модели можно путем расчета параметра «пространственное затухание», представляющего собой затухание сигнала, измеряемое в децибелах [дБ]. Проще говоря, это разница между передаваемой и принимаемой мощностями.

Модель распространения в городских условиях

Радиопередача при мобильной коммуникации вне помещения обычно происходит на пересеченной местности. Профиль конкретной местности необходимо брать в расчет для оценки пространственного затухания. Этот профиль может варьироваться от слегка холмистого до высокогорного. Присутствие деревьев, строений и прочих естественных препятствий для радиоволны также должно учитываться. Для прогнозирования пространственного затухания в условиях застроенной местности могут быть полезными разнообразными модели распространения.

Применим мультипараметрический стохастический подход к прогнозированию распространения радиосигнала в городской среде, сочетающий в себе учет многолучевого распространения вдоль прямых улиц, пересекающих и прилегающих к ним улиц, а также естественные и искусственные препятствия, распределенные на пересеченной местности беспорядочно (по Пуассону, для обычного потока рассеивателей). Общие формулы были получены авторами в работах [10–17] для прогнозирования затухания радиосигнала при различных сценариях с разными высотами базовых станций (BS) и абонентских антенн. Более того, в соответствии с результатами, изложенными в работе [11], основные формулы были представлены в виде простых уравнений прямых линий в математике, как это обычно предлагается другими авторами [19–21]. В зависимости от высоты антенн BS и мобильного пользователя (MS) существует несколько сценариев для застроенной местности. Здесь мы представим наиболее общий сценарий, который в основном распространен в реальных городских условиях, т. е. в условиях, когда антенна BS расположена выше или на уровне крыш, а антенна MS находится ниже уровня крыш.

Для упрощения основной стохастической модели можно выделить три возможных сценария в условиях городской среды:

1) условия псевдовидимости (Quasi-LOS);

2) условия непрямой видимости (Non-LOS) с однократной дифракцией, рассеиванием и отражением;

3) условия Non-LOS с многократной дифракцией, рассеиванием и отражением.

Рассмотрим первый сценарий — Quasi-LOS (рис. 3, а). В данном случае, согласно работе [11], имеем

$$L_1(r) = -32,4 - 20 \log f - 20 \log r - L_{\text{fading}} + (G_{\text{BS}} + G_{\text{MS}}) [\text{дБ}], \quad (1)$$

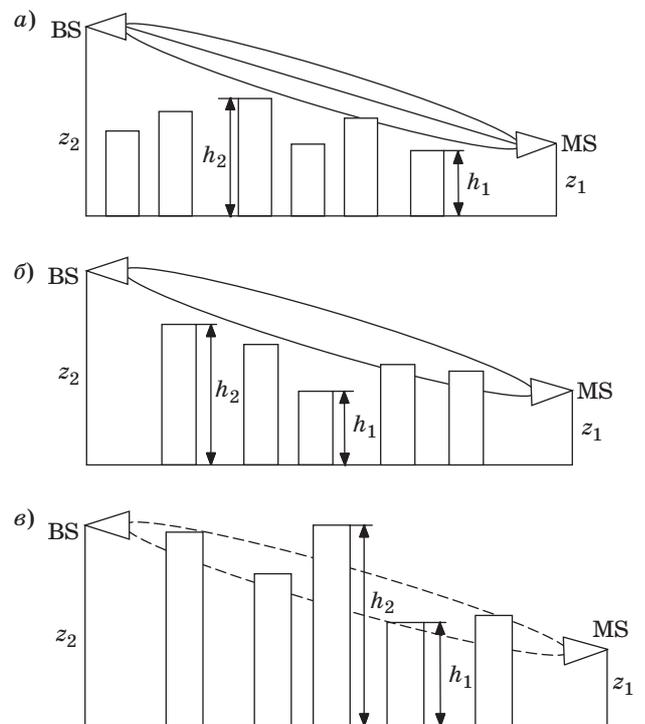
где

$$L_{\text{fading}} = 10 \log \left[\gamma_0 r \frac{F(z_1, z_2)}{h_2 - h_1} \right] = 10 \log \left[\gamma_0 r \frac{F(z_1, z_2)}{\Delta h} \right], \quad (2)$$

и наложение профиля зданий, определяемое как

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

Здесь f — излучаемая частота, МГц; r — расстояние между антеннами BS и MS с высотой z_1 и z_2 соответственно, км; G_{BS} и G_{MS} — усиления антенн; $F(z_1, z_2)$ — профиль зданий между антеннами BS и MS, определенный для данного сценария как (2); h_1 и h_2 — минимальная и максимальная



■ Рис. 3. Антенна BS над крышами, антенна MS под крышами с видимостью 85–100 % (а), 50 % (б) и 10–20 % (в) между ними

ная высоты зданий; n — параметр полиномиального распространения зданий; $\gamma_0 = 2\bar{L}v/\pi$ — одномерные контуры зданий, км^{-1} ; \bar{L} — средняя ширина/длина зданий (в зависимости от расположения здания с учетом направления лучей антенны); v — количество зданий на квадратный километр.

Второй сценарий — Non-LOS с однократной дифракцией (рис. 3, б). Здесь, согласно работе [11], имеем

$$L_2(r) = -32,4 - 30\log f - 30\log r - L_{\text{fading}} + (G_{\text{BS}} + G_{\text{MS}}) [\text{дБ}], \quad (4)$$

где

$$L_{\text{fading}} = 10\log \frac{\gamma_0 l_v F(z_1, z_2)}{|\Gamma| \left[\frac{\lambda r}{4\pi^3} + (z_2 - \bar{h})^2 \right]^{1/2}}. \quad (5)$$

Третий сценарий — Non-LOS с многократной дифракцией (рис. 3, в). В данном случае с учетом полученных результатов [11]

$$L_3(r) = -41,3 - 30\log f - 30\log r - L_{\text{fading}} + (G_{\text{BS}} + G_{\text{MS}}) [\text{дБ}], \quad (6)$$

где

$$L_{\text{fading}} = 10\log \frac{\gamma_0^4 l_v^3 F^4(z_1, z_2)}{\lambda |\Gamma|^2 \left[\frac{\lambda r}{4\pi^3} + (z_2 - \bar{h})^2 \right]}. \quad (7)$$

Здесь

$$F(z_1, z_2) = \begin{cases} (h_1 - z_1) + \frac{(\Delta h)^2 - (h_2 - z_2)^2}{2\Delta h}, & h_1 > z_2, h_2 > h_1 > z_1 \\ \frac{(h_2 - z_1)^2 - (h_2 - z_2)^2}{2(\Delta h)}, & h_1 < z_2, h_2 > h_1 > z_1 \end{cases}; \quad (8)$$

l_v — когерентный масштаб шероховатости стены при диффузном отражении или рассеянии; $|\Gamma|$ — абсолютная величина коэффициента отражения, обычно получаемая из классических формул, зависящих от диэлектрических характеристик стен зданий [12, 19, 21].

Модель распространения в помещении

Радиоканалы в помещении отличаются от традиционных мобильных радиоканалов — площадь покрытия намного меньше, а разновидностей окружения гораздо больше при меньшем диапазоне территориального разнеса передатчика и приемника.

Распространение радиосигнала в здании сильно зависит от следующих характеристик: положения здания, использованных при строительстве материалов, типа здания, его формы, архи-

тектуры и т. п. Еще более разнообразные условия распространения в помещении здания: открытая/закрытая дверь или окно, уровень потолка и мебели и др., — а также местоположение антенны сильно влияют на уровень и характер распространения сигнала.

Для каналов в помещении мы предлагаем также мультипараметрическую стохастическую модель [12, 18]:

$$L_T = -32,44 - 20\log f - 10\log \left[\frac{\gamma_0(r+\tilde{r})}{d} \sin^2 \frac{d}{2} \right] - 2,4[\gamma_0(r+\tilde{r})] - 10\log [T_{\text{wall}} \cdot T_{\text{floor}}] - 10\log \frac{d[(r+\tilde{r}) - d\cos\varphi]}{(r+\tilde{r})^2 - d^2} - 8,6 \frac{|\ln(XR_{\text{wall}})|}{d'(\varphi)(r+\tilde{r}) - d\cos\varphi} + (G_{\text{BS}} + G_{\text{MS}}) [\text{дБ}], \quad (9)$$

где d — расстояние между антеннами BS и MS;

T — тип материала: $|T_{\text{wall}}| = \sum_{i=1}^N |T_{wi}|$, $|T_{\text{floor}}| = \sum_{i=1}^N |T_{fi}|$, $|T_{fi}| \equiv |T_{wi}| = \sqrt{1 - \chi} |R_n|$; r — расстояние между антенной BS и преградой; \tilde{r} — расстояние между преградой и антенной MS: $\tilde{r} = \sqrt{(d^2 + r^2 - 2rd\cos\varphi)}$; φ — угол между направлением прямого и отраженного от преграды радиолучей; X — отношение между шириной комнат и расстоянием между комнатами, расположенными вдоль коридора; $0,1 < \chi < 1$ — измеренный фактор [19].

Емкость и спектральная эффективность объединенной сети фемто/пико/макросот

Сравнительный анализ различных способов развертывания фемтосетей

Здесь, основываясь на исследованиях, проведенных в работах [1–8], и следуя алгоритму расчета и результатам, полученным в работе [9] для сетей фемто/макросот, рассмотрим способы развертывания сетей фемтосот, используемых для увеличения пропускной способности в системах нового поколения. Как указывалось во введении, помехи между фемтосотами и (или) пико/фемтосотами — ключевая проблема для улучшения пропускной способности и спектральной эффективности канала связи.

Рассмотрим макросеть, где \tilde{M} — станция макроэлемента сети (mMS), сообщающаяся с базовой станцией макросети (mBS). Пусть B_{mac} обозначает доступную полосу спектра для макроэлемента сети. Кроме того, рассмотрим простой планировщик, определяющий равную пропускную спо-

способность $B_{m,i} = B_{\text{mac}} / \tilde{M}$ для каждой из mMS. Тогда, в отсутствие каких-либо фемтосот, пропускную способность канала mMS можно представить в виде

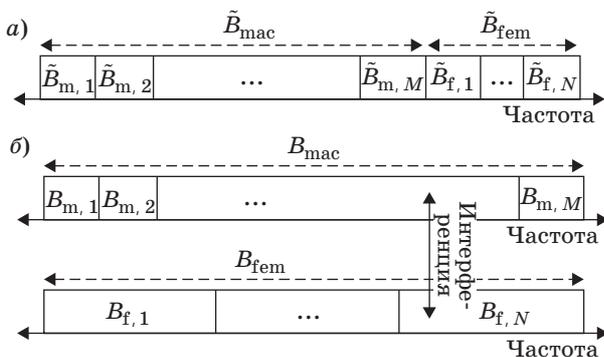
$$C_{m,i}^{(\text{nf})} = \frac{B_{\text{mac}}}{M} \log_2 \left(1 + \frac{\tilde{M} P_{m,i}}{B_{\text{mac}} N_0} \right), \quad (10)$$

где (nf) относится к сценарию без фемтосот; $P_{m,i}$ — принимаемая мощность для i -й mMS, а N_0 — уровень шума. Как видно из (10), пропускная способность mMS будет увеличиваться с уменьшением \tilde{M} при увеличении B_{mac} и с ростом $P_{m,i}$. Таким образом, пропускная способность канала для пользователя в помещении будет ниже, чем для пользователя на улице; уровень пропускной способности зависит от потерь при проникновении через стену, уменьшающих значения $P_{m,i}$.

Эту проблему можно решить использованием фемтосот в закрытых помещениях, что приведет к увеличению принимаемой мощности (и при обычных настройках — к большей пропускной способности) для пользователей в помещении и обеспечит более высокую пропускную способность каналов. В следующем разделе мы рассмотрим три различных режима развертывания фемтосот, а также исследуем их влияние на пропускную способность канала для пользователей макроэлементов и фемтосот. Здесь же рассмотрим три различных режима развертывания фемтосот:

- выделенный канал в сравнении с совмещенным каналом;
- открытый доступ (OSG) в сравнении с закрытой абонентской группой (CSG);
- фиксированная мощность передачи нисходящего канала в сравнении с адаптивной мощностью передачи этого канала.

При выделенном канале фемтосотам выделяется отдельный спектр — DSA (пропускная способность \tilde{B}_{fem}), в отличие от макроэлементов (рис. 4, а). Хотя это в основном устраняет потенциальные помехи от макросети, однако частотные ресурсы при этом использованы неэффективно.



■ Рис. 4. Передача в выделенном (а) и совмещенном (б) каналах

Пропускную способность mMS с выделенным каналом можно записать как

$$C_{m,i}^{(\text{dc})} = \frac{B_{\text{mac}} - \tilde{B}_{\text{fem}}}{M} \log_2 \left(1 + \frac{M P_{m,i}}{(B_{\text{mac}} - \tilde{B}_{\text{fem}}) N_0} \right), \quad (11)$$

где верхний индекс (dc) означает вариант с установлением выделенного канала; i — индекс mMS; \tilde{B}_{fem} — полоса пропускания в сетях фемтосот, а $M < \tilde{M}$ — число мобильных станций связи, объединенных с макросотами. Сравнивая уравнения (10) и (11), отметим, что с введением фемтосот имеем менее доступный спектр для сети макроэлементов. Однако $\tilde{M} - M$ пользователей смещаются на сети фемтосот и больше не используют частотные ресурсы макроэлементов. Таким образом, в целом пропускная способность канала пользователя макроэлемента может быть увеличена с уменьшением значений \tilde{B}_{fem} и M .

С другой стороны, пропускная способность мобильной станции фемтосот (fMS) с выделенным каналом может быть записана как

$$C_{m,i}^{(\text{nf})} = \frac{\tilde{B}_{\text{fem}}}{N} \log_2 \left(1 + \frac{N P_{f,i}}{\tilde{B}_{\text{fem}} N_0} \right), \quad (12)$$

где N — количество пользователей на одну фемтосоту; $P_{f,i}$ — мощность принимаемого сигнала от базовой станции фемтосот (fBS). Сравнение уравнений (10) и (12) показывает, что даже если полоса пропускания для каждого пользователя $(\tilde{B}_{f,i}) = \tilde{B}_{\text{fem}} / N$ может быть такой же, как и пропускная способность для пользователей макроэлемента в помещении без каких-либо фемтосот, принимаемые мощности $P_{f,i}$, как правило, существенно увеличиваются с применением фемтосот, повышая пропускную способность канала для пользователей в помещении.

Совмещенный канал с применением фемтосот дает возможность более эффективно использовать имеющийся спектр — SSA. Макроэлемент, как и фемтосота, будет иметь большую пропускную способность в расчете на одного пользователя при использовании совмещенного канала (соответственно, $B_{m,i} > \tilde{B}_{m,i}$ и $B_{f,i} > \tilde{B}_{f,i}$) (рис. 4, б). Кроме того, процесс поиска ячейки для mMS становится проще, поскольку не нужно искать ячейки в различных диапазонах частот (например, в целях передачи). Однако при использовании совмещенного канала будут наблюдаться помехи в фемтосотах и макроэлементах.

Пропускную способность канала mMS при реализации совмещенного канала фемтосот можно записать в следующем виде:

$$C_{m,i}^{(\text{cc})} = \frac{B_{\text{mac}}}{M} \log_2 \left(1 + \frac{M P_{m,i}}{I_{\text{fem}} + B_{\text{mac}} N_0 / M} \right), \quad (13)$$

где верхний индекс (cc) означает совмещенный канал фемтосот и I_{fem} — общие помехи, наблюда-

емые во всех соседних сетях фемтосот. Сравнивая уравнения (13) и (10), видим, что пропускная способность в расчете на одного пользователя улучшается с использованием совмещенного канала ($B_{m,i} > \tilde{B}_{m,i}$). Однако в mMS также наблюдаются помехи от соседних сетей фемтосот, которые могут ухудшить пропускную способность, если они существенные. Следовательно, улучшается пропускная способность или нет по отношению к варианту с выделенным каналом, зависит как от \tilde{B}_{fem} , так и от I_{fem} . Аналогичным образом сравнение уравнений (13) и (11) показывает, что улучшение пропускной способности канала по отношению к варианту с применением фемтосот зависит как от M , так и от I_{fem} .

С другой стороны, пропускную способность fMS с применением совмещенного канала можно записать как

$$C_{m,i}^{(dc)} = \frac{B_{fem}}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_{f,i}}{I_{mac} + B_{fem} N_0 / N} \right), \quad (14)$$

где $B_{fem} = B_{mac} \gg \tilde{B}_{fem}$. Это предполагает значительное увеличение пропускной способности на одного пользователя фемтосот, которое происходит из-за помех I_{mac} , наблюдаемых от пользователей макроэлементов и базовых станций mBS. Поскольку пропускная способность FAP влияет на пропускную способность канала линейно, а помехи влияют на пропускную способность канала по логарифмическому закону, применение *совмещенного канала*, как правило (и как обсуждалось в ряде других работ), приводит к улучшению общей пропускной способности по сравнению с использованием *выделенного канала*.

Открытый доступ и закрытая абонентская группа. Для сетей фемтосот открытого доступа возможно присоединение любого из mMS. Для CSG-фемтосот, с другой стороны, конкретный mMS, который может присоединиться к конкретной сети фемтосот, ограничен определенной группой. Поэтому для CSG-режима конкретная сеть фемтосот может получить существенные помехи (и вызвать их) от mMS, находящегося недалеко от совмещенного канала, поскольку допуск к сети фемтосот ему не будет предоставлен. Изменение пропускной способности канала для CSG- и OSG-режима описано с помощью уравнений (13) и (14). Для режима открытого доступа фемтосота будет обслуживать большее количество fMS, поскольку находящиеся неподалеку mMS будут влиять на фемтосоты. Поэтому пропускная способность, доступная для одного пользователя fMS (B_{fem}/N), будет уменьшаться (13). Однако те mMS, которые присоединяются к фемтосотам, как правило, вызывают самые сильные помехи для них. Следовательно, длительность помех I_{mac} будет значи-

тельно снижаться в режиме открытого доступа, и только далеко находящиеся mMS будут по-прежнему являться причиной помех. Это, как правило, можно компенсировать сужением полосы частот для fMS, что улучшит и пропускную способность фемтосот. Анализ уравнения (14) показывает, что режим открытого доступа позволит увеличить пропускную способность для пользователя макроэлемента (B_{mac}/M), повышая пропускную способность для оставшихся пользователей, связанных с макроэлементом. По результатам моделирования OSG-режим обеспечивает более высокую общую производительность системы и более широкий охват, в то время как режим CSG имеет большую поверхностную пропускную способность в целом (определяется как отношение пропускной способности системы с фемтосотами к пропускной способности системы без фемтосот). Следует отметить, что режим открытого доступа по сравнению с CSG может иметь ряд проблем, связанных с безопасностью, дополнительной нагрузкой на транзитное соединение для владельца фемтосот и т. д.

Фиксированная мощность в сравнении с адаптивной мощностью передачи нисходящего канала. Априори фиксированную мощность mBS распределяют для FAP, находящегося в соответствующей макросети, как правило, на уровне 13 или 20 дБ [1–9]. В случае с адаптивной мощностью передачи fBS может настроить мощность передачи с учетом помех, вызванных/полученных у/от макроячейки и других соседних фемтосот. Например, ближайшие к mBS фемтосоты могут передавать на максимальном уровне мощности (из-за значительных помех со стороны mBS), при приближении фемтосот к краям ячейки может уменьшиться их мощность передачи, и помехи mBS будут слабее. Уменьшение fBS-мощности передачи будет также уменьшать помехи I_{fem} в сети макроячейки (13). Для фемтосот с более низкой мощностью передачи наблюдается снижение пропускной способности конкретных сетей, несмотря на то, что пропускная способность макроячейки может увеличиться. Типичный подход для управления мощностью таким образом, что коэффициент помех сигнала будет стремиться к 0 дБ на границах фемтосоты, был рассмотрен в работах [6, 8].

Моделирование

Процесс моделирования представим и опишем поэтапно.

1. Выбирается городская среда и выполняется картографирование местности (улицы/помещения).

2. Определяются конкретные параметры эксперимента в виде процентного распределения



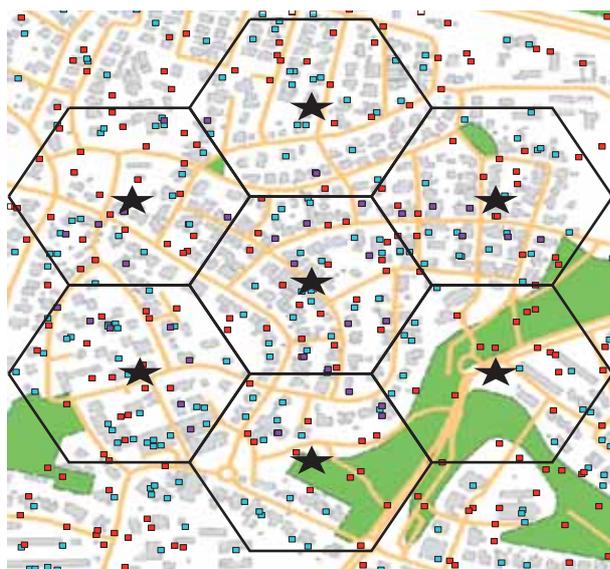
■ Рис. 5. Области равномерного распределения пользователей

пользователей сотовой связи по категориям. Производится расположение пользователей в помещении в соответствии с заданным процентным соотношением.

3. Производится расположение пользователей фемтосот, как показано на рис. 5, с выделением трех областей на карте:

- центральный радиус — радиус, близкий к BS (около 150 м);
- граница ячейки — кольцо вокруг центрального радиуса (150 – 200 м);
- вне области — все остальное.

Расположение семи станций (пикосот) и пользователей по категориям на карте города Сдерот (Израиль) показано на рис. 6.



- Внутренний пользователь
- Внешний пользователь
- Пользователь фемтосети
- ★ BS

■ Рис. 6. Карта покрытия станциями города Сдерот

4. Рассчитывается пространственное затухание согласно стохастической мультипараметрической модели для помещений и улицы.

Следующие шаги связаны только с пользователями, расположенными в центре выбранной пикосоты.

5. Строится карта индикатора мощности принимаемого сигнала (*RSSI*), показывающая мощность сигнала каждого MS в зависимости от его положения относительно BS (прямой путь), рассчитанная в соответствии с картой помещения/улицы и выбранной моделью развертывания.

6. Рассчитывается пропускная способность канала для различных конфигураций сети. Для каждой конфигурации сети производятся отдельные расчеты.

В настоящей работе исследования проводились для четырех конфигураций: CSG SSA, CSG DSA, OSG SSA, OSG DSA.

Каждый эксперимент проводился в кратковременный период, т. е. в начальной точке мы не будем наблюдать разницу пропускной способности CSG и OSG, поскольку это связано с тем, что количество пользователей для фемтосот и пикосот одинаково для обоих подходов.

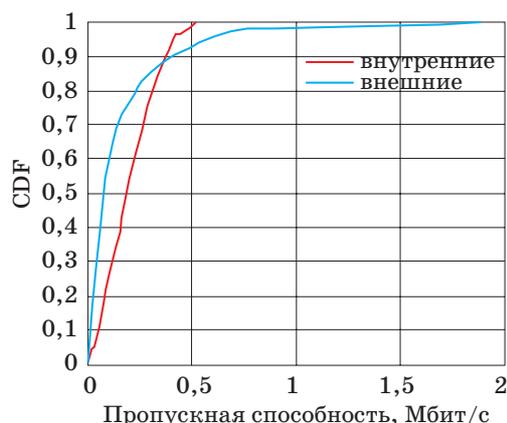
Для моделирования разницы между CSG и OSG необходимо добавить промежуточную стадию, которую назовем «хэндовер» (переключение), являющуюся следующим временным периодом ($t + 1$) после начальной точки. В течение данного шага мы «позволим» пользователям OSG подключаться к другим фемтосотам или пикосотам в зависимости от мощности, получаемой приемником. Все пользователи в процессе моделирования статичны, т. е. в кратковременном периоде не происходит физических перемещений.

В результате данного шага моделирования была обнаружена разница пропускных способностей, вызванная изменением количества пользователей фемто/пикосот, которое влияет на величину пропускной способности (до и после «хэндовера»).

7. При составлении графиков наша цель — проверить базовый сценарий сетей, включающий использование пикосот без развертывания фемтосот. При распределении пропускной способности пользователей, 50 % из которых находились в помещении, лишь у 13 % наблюдается пропускная способность канала выше 0,4 Мбит/с (рис. 7).

Далее проводилось исследование влияния размещения FAP в сети. Для этого в моделирование были включены два отличающихся подхода развертывания FAP (CSG и OSG):

а) негативный сценарий (рис. 8, а), где 75 % центральных и 25 % граничных пользователей определены как фемтопользователи;



■ Рис. 7. Распределение пропускной способности пользователей в сетях без фемтосот

б) позитивный сценарий (рис. 8, б), где 10 % центральных и 80 % граничных пользователей — фемтопользователи.

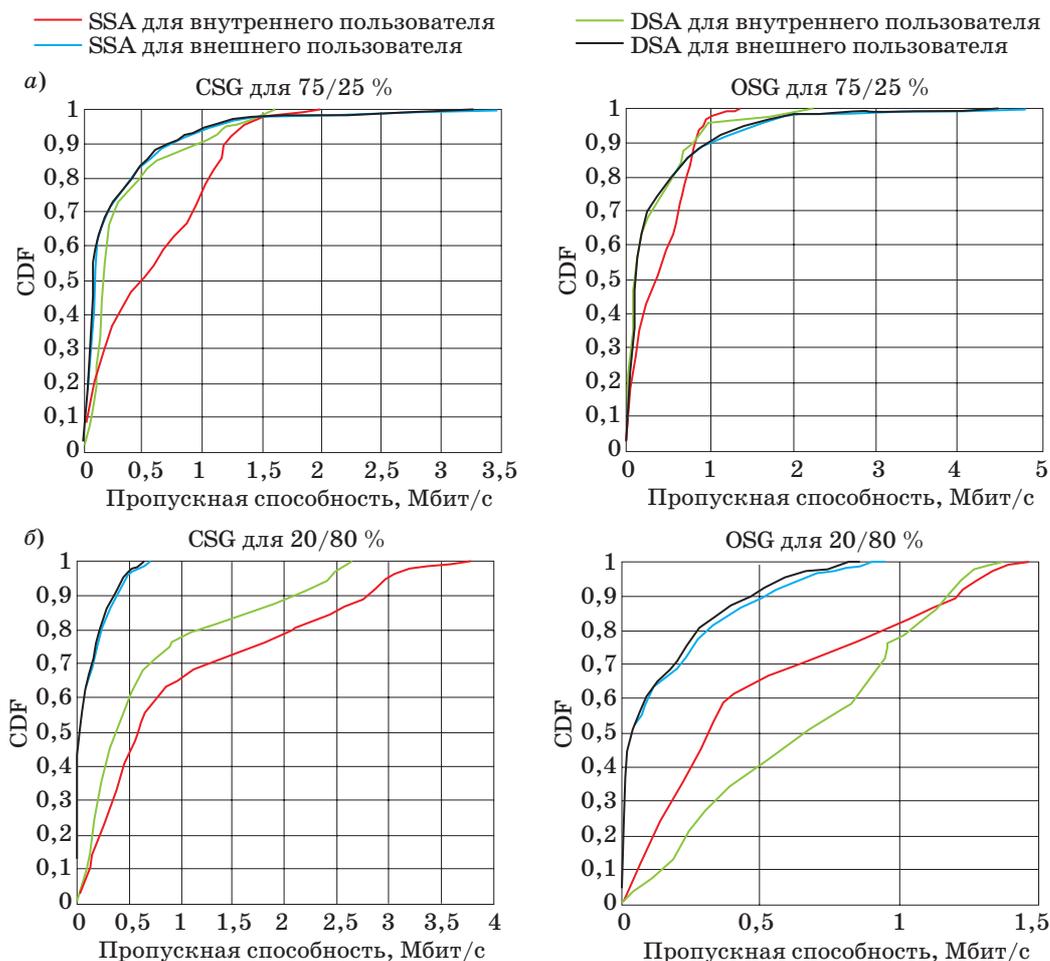
Из приведенных выше примеров можно наблюдать, во-первых, и это наиболее важно, уве-

личение пропускной способности с использованием фемтосот вне зависимости от процента их развертывания. Кроме того, данные примеры отражают разницу между:

- лучшим вариантом (позитивным сценарием), при котором меньшее количество пользователей (FAP) расположено близко к BS, мощность сигнала относительно высокая, а большее количество находится на границах сот, где мощность сигнала намного меньше в связи с затуханием его в канале, — все это происходит при удалении от центра соты;

- худшим вариантом (негативным сценарием), при котором большее число FAP расположено рядом с радиусом BS, где мощность сигнала BS высокая, а одновременно большое количество FAP вызывает крайне высокие и нежелательные помехи. С другой стороны, на границах сот, где ожидалось улучшение сигнала FAP, мы получили противоположный результат при использовании меньшего количества FAP.

В дополнение можно отметить с точки зрения конфигурации сети (CSG/OSG) улуч-



■ Рис. 8. Пропускная способность при негативном (а) и позитивном (б) сценарии для четырех пользователей в помещении (слева) и на улице (справа)

■ Параметры сценариев моделирования

Пользователи в помещении, %	FAP, %		
	в центре	на границе	вне радиуса
25	25	25	25
25	25	25	50
25	25	25	75
25	25	25	100
25	25	50	25
.....			
75	25	25	25
.....			
75	100	100	100

шение при использовании «хэндовера» на графиках OSG.

Каждый эксперимент одного и того же сценария давал незначительно отличающиеся результаты. Авторы пришли к пониманию того, что требуется более эффективный метод для оценки полученных результатов. Более того, необходимо найти оптимальное развертывание фемтосот, что требует моделей поведения сети для каждого сценария развертывания. Получив такую модель, можно будет найти оптимальное решение и вывести общий алгоритм, приводящий к финальной стадии рассматриваемого моделирования.

Сценарии состоят из параметров (процентов FAP), каждый из которых может принимать следующие значения:

- в помещении — 25, 50, 75;
- в центре, на границе, за радиусом — 25, 50, 75, 100.

Всего имеется 192 различных сценария (таблица) для каждого подхода (CSG/OSG), поэтому были взяты средние результаты для 10 различных экспериментов в каждом сценарии, т. е. 1920 экспериментов для каждого состояния нагрузки сети — плотной и разряженной. Всего, таким образом, было проведено 3840 экспериментов.

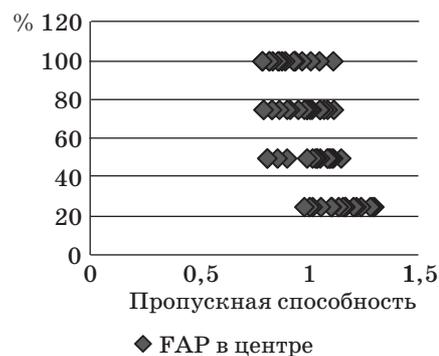
Результаты численных расчетов

В процессе работы проведено большое количество экспериментов, будет рассмотрена лишь часть из них.

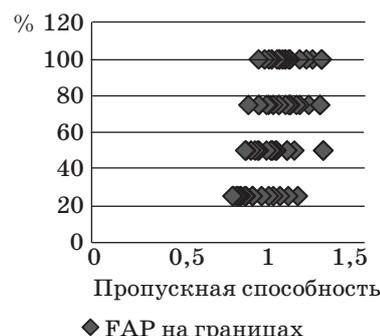
На основе полученных данных построены диаграммы в числах для конкретной конфигурации сети, проанализированы результаты и сделаны выводы. Каждая диаграмма отражает результаты для указанного процента пользователей в помещении для определенного режима сети (CSG SSA, CSG DSA и т. п.). Результаты включают в себя всего 64 точки рассеивания — 16 точек на линию. Каждая исследованная точка представляет конкретный сценарий. Линия на диа-

грамме означает группу сценариев, имеющих одинаковое количество FAP в центре и на границах. Рассеивание точек — пределы пропускной способности в зависимости от выбранного сценария (рис. 9, а, б).

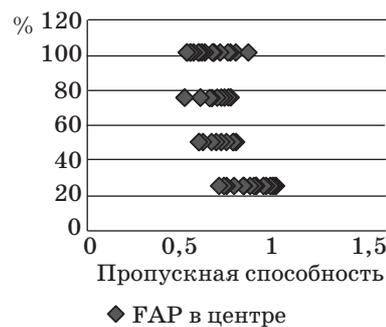
а) CSG SSA – 25 % развертывания в помещении



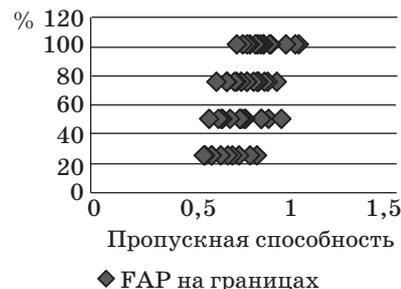
CSG SSA – 25 % развертывания в помещении



б) CSG SSA – 75 % развертывания в помещении



CSG SSA – 75 % развертывания в помещении



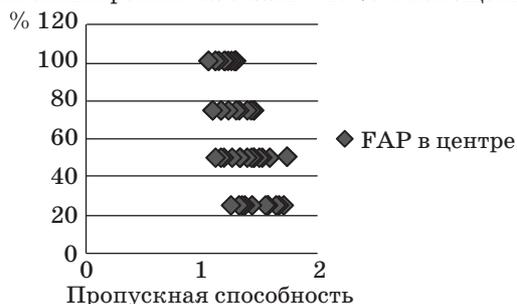
■ Рис. 9. Процент пользователей и пропускная способность при 25 %-м (а) и 75 %-м (б) развертывании для CSG SSA

Из рис. 9 (FAP в центре) видно, что увеличение процента пользователей в помещении в пико/микросотах приводит в общем к уменьшению пропускной способности канала (от 0,8–1,3 до 0,5–1,0 Мбит/с). Та же тенденция наблюдается для пользователей, находящихся на границе (FAP на границах). Как объяснялось ранее, пользователи в помещении испытывают неудобство от затухания сигнала при проникновении через стену, которое сильно снижает его мощность и пропускную способность. Поэтому для большего числа пользователей в помещении характерны более низкие средние показатели пропускной способности канала.

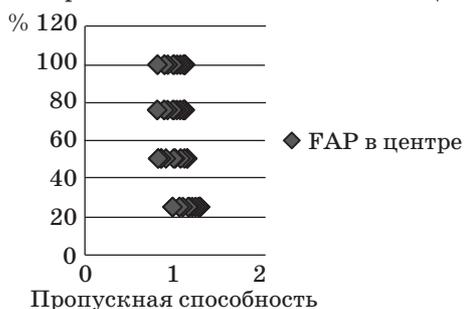
Более высокий процент FAP в центре пико/микросот приводит к меньшей средней пропускной способности. Обратное наблюдается при FAP на границах. Причина очевидна — мобильные пользователи в близости от центральной mBS получают относительно мощный сигнал, поэтому здесь нет необходимости размещать фемтосоты. Включение FAP в центр микросоты приведет к увеличению шумов и помех, а также к снижению мощности сигнала. С другой стороны, на границах сот сигнал становится слабее, и поэтому именно в этой области разумно размещать фемтосоты. Развертывание большего количества FAP на границах приведет к заметному увеличению средней пропускной способности канала для каждого пользователя.

Такая же ситуация наблюдается для OSG SSA (рис. 10).

Разряженный режим OSG SSA – 25 % в помещении



Загруженный режим OSG SSA – 25 % в помещении



■ Рис. 10. Процент пользователей и пропускная способность при OSG SSA

На рис. 11, а и б представлены результаты для CSG DSA, показывающие ту же ситуацию, что и для пользователей в центре соты. Разница появляется лишь для пользователей на границе (рис. 11, в) — здесь тенденция менее заметна.

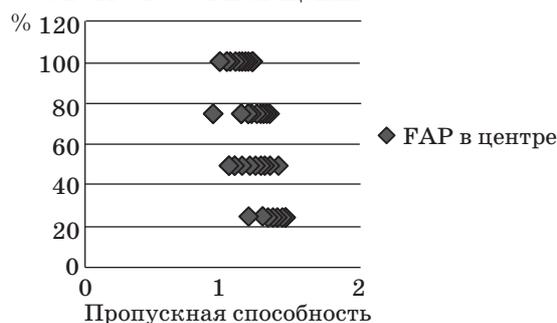
Для внесения большей ясности в оценку результатов необходимо осознать разницу между двумя конфигурациями.

При SSA для всех пользователей диапазон одинаков, т. е. помехи возникают от всех передатчиков в радиусе пользователя, в то время как для DSA помехи меньше из-за выделенного диапазона. Если детально проанализировать формулу емкости, то видно, что на нее влияют несколько параметров: I — интерференция, Bw — пропускная способность, d — расстояние, $RSSI$ — индикатор мощности получаемого сигнала. При SSA независимо от того, является ли пользователь фемто- или пикопользователем, интерференция, расстояние и пропускная способность остаются

а) CSG DSA – 75 % в помещении



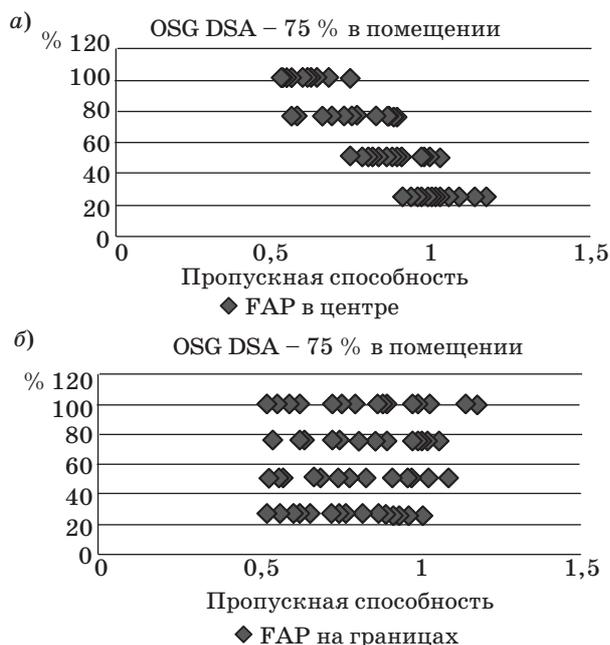
б) CSG DSA – 25 % в помещении



в) CSG DSA – 75 % в помещении



■ Рис. 11. Процент пользователей и пропускная способность при CSG DSA для 75 % (а) и 25 % (б) пользователей в центре и для 75 % (в) на границе



■ **Рис. 12.** Процент пользователей и пропускная способность при OSG DSA: FAP в центре (а) и на границе (б)

прежними. Это происходит из-за того, что они делают один диапазон. В данном случае изменяется лишь параметр *RSSI*, когда фемто- или пикопользователь находится на нужном месте относительно антенны BS. Заметим, что чем больше фемтопользователей на границе, тем выше общая мощность сигнала.

При DSA ситуация более сложная. Когда расстояние остается прежним, пропускная способность и интерференция изменяются при различных процентах развертывания фемтосот. Это происходит из-за выделенного диапазона. При росте развертывания FAP интерференция пользовате-

лей пикосот падает, а для пользователей фемтосот — растет, и наоборот. В дополнение стоит отметить, что увеличение FAP уменьшает пропускную способность для пользователей фемтосот и увеличивает для пользователей пикосот. При DSA наблюдается взаимозависимость между тремя параметрами — *I*, *Bw* и *RSSI*, что связано с несущественной разницей на диаграмме (рис. 12, а, б).

Из двух последних диаграмм видны результаты для OSG DSA, в которых наблюдается сходство с CSG DSA.

Заключение

Отметим, что в работе оптимальная конфигурация развертывания не найдена, однако были получены следующие важные результаты.

Усиление общего отношения *C/I* сети не всегда приводит к увеличению пропускной способности, особенно при условии оптимального (или хорошего) размещения FAP.

Обнаружилась тенденция поведения сети в зависимости от процентного развертывания FAP. Меньшее количество пользователей в центре должно использовать FAP, однако для пользователей на границах развертывание FAP рационально.

Замечено влияние высоты зданий на пропускную способность для пользователей и общую емкость сети. Более высокие здания приводят к худшему сценарию NLOS, что связано с увеличением пространственного затухания и уменьшением емкости. Использование фемтосот в таких ситуациях и местностях повышает пропускную способность не только для пользователей на границах, но и для находящихся в центре.

Авторы благодарят студентов Негевского университета им. Бен-Гуриона И. Верзвергера и Л. Иртуганову за помощь в численных расчетах.

Литература

1. Chandrasekhar V., Andrews J. G., Gatherer A. Femtocell networks: A survey // IEEE Communications Magazine. 2008. Vol. 46. N 9. P. 59–67.
2. Mahmoud H., Guvenc I. A comparative study of different deployment modes for femtocell networks // Proc. of IEEE Int. Symp. Personal, Indoor, Mobile Radio Commun. (PIMRC). 2009. P. 1–5.
3. Markendahl J., Makitalo O. A comparative study of deployment options, capacity and cost structure for macro cellular and femtocell networks // IEEE 21th Intern. Symp. on PIMRC. 2010. P. 145–150.
4. Pirinen P. Co-channel co-existence study of outdoor macro cell and indoor femtocell users // IEEE Wireless Conf. 2010. P. 207–213.
5. Nihtila T. Capacity improvement by employing femtocells in a macrocell HSDPA Network // IEEE. Magister Solutions Ltd. Finland, 2008. – 96 p.
6. Claussen H. Performance of macro- and co-channel femtocells in a hierarchical cell structure // Proc. of IEEE Int. Symp. Personal, Indoor, Mobile Radio Commun. (PIMRC). Athens, Greece, Sept. 2007. 5 p.
7. Chandrasekhar V., Andrews J. G. Uplink capacity and interference avoidance for two-tier cellular networks // Proc. IEEE Global Telecommun. Conf. (GLOBECOM), Washington, DC, Nov. 2007. 5 p.
8. Guvenc I., Jeong M. R., Watanabe F., Inamura H. A hybrid frequency assignment for femtocells and coverage area analysis for co-channel operation //

- IEEE Commun. Lett. Dec. 2008. Vol. 12. N 12. P. 880–882.
9. **Tsalolikhin E., Bilik I., Blaunstein N., Babich Y.** Channel capacity in mobile broadband heterogeneous networks based femto cells // Proc. of 6th European Conf. on Antennas and Propagation (EUCAP). Prague (Czech Republic). Mar. 2012. 5 p.
 10. **Blaunstein N.** Average field attenuation in the nonregular impedance street waveguide // IEEE Trans. Anten. and Propagat. 1998. Vol. 46. N 12. P. 1782–1789.
 11. **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.
 12. **Blaunstein N., Christodoulou Ch.** Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Links: Terrestrial, Atmospheric and Ionosphere. — New Jersey: Wiley, InterScience. 2007. — 614 p.
 13. **Blaunstein N.** Wireless Communication Systems // Handbook of Engineering Electromagnetics Applications / ed. by R. Bansal; Boca Raton, FL: CRC Press, 2006. P. 37–98.
 14. **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.
 15. **Blaunstein N.** Prediction of cellular characteristics for various urban environments // J. Anten. Propagat. Magazine. 1999. Vol. 41. N 6. P. 135–145.
 16. **Blaunstein N. et al.** Prediction of loss characteristics in built-up areas with various buildings overlay profiles // IEEE Anten. Propagat. Magazine. 2001. Vol. 43. N 6. P. 181–191.
 17. **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. Magazine. Oct. 2009. Vol. 51. N 5. P. 200–208.
 18. **Ben-Shimol Y., Blaunstein N.** Path loss spatial distribution in indoor / outdoor RF environments // Proc. of Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE). Rome, Italy. Sept. 2012. 5 p.
 19. **Bertoni H. L.** Radio Propagation for Mobile Wireless Systems. — New Jersey: Prentice Hall PTR, 2000. — 276 p.
 20. **Okumura Y., Ohmori E., Kawano T., Fukuda K.** Field strength and its variability in the VHF and UHF land mobile radio service // Review Elec. Commun. Lab. 1968. Vol. 16. N 9–10. P. 825–843.
 21. **Rappaport T. S.** Wireless Communications. — New Delhi: Prentice Hall, 2007. — 641 p.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Национальная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы зарегистрируетесь на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющих в базе данных НЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.