

УДК 621.396.2: 621.396.931

Копейка О. В., докт. техн. наук, с.н.с. (Тел.: +380 (44) 249 29 23. E-mail: okopiyka@gmail.com)

Деревянных А. Е., аспирант (Тел +380 (50) 462 28 72. E-mail: alex_der@ukr.net)

(Государственный университет телекоммуникаций, г. Киев)

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ РАДИОПЛАНИРОВАНИЯ СЕТЕЙ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ НОВЫХ ПОКОЛЕНИЙ 3G/4G

Копійка О. В., Дерев'яних О. Є. Аналіз ефективності алгоритмів радіопланування мереж мобільного зв'язку нових поколінь 3G/4G. Розглянута задача радіопланування мереж мобільного зв'язку нових поколінь 3G/4G з урахуванням внеску складових вторинного розсіяного поля від неоднорідностей і статистики затінувань на шорсткій поверхні. Розроблений алгоритм оптимального розміщення базових станцій в зоні покриття за критерієм мінімального числа базових станцій з обмеженнями на мінімально допустиму якість сервісу. Дані порівняльні оцінки ефективності застосування алгоритмів класичного табу-пошуку і табу-пошуку з локальною апостеріорною оптимізацією. Приведені деякі результати чисельного моделювання.

Ключові слова: мережа мобільного зв'язку, радіопланування, кореляція висот поверхні, діаграма Вороного, табу-пошук, локальна апостеріорна оптимізація

Копейка О. В., Деревянных А. Е. Анализ эффективности алгоритмов радиопланирования сетей мобильной связи новых поколений 3G/4G. Рассмотрена задача радиопланирования сетей мобильной связи новых поколений 3G/4G с учетом вклада составляющих вторичного рассеянного поля от неоднородностей и статистики затенений на шероховатой поверхности. Разработан алгоритм оптимального размещения базовых станций в зоне покрытия по критерию минимального числа базовых станций с ограничениями на минимально допустимое качество сервиса. Даны сравнительные оценки эффективности применения алгоритмов классического табу-поиска и табу-поиска с локальной апостериорной оптимизацией. Приведены некоторые результаты численного моделирования.

Ключевые слова: сеть мобильной связи, радиопланирование, корреляция высот поверхности, диаграмма Вороного, табу-поиск, локальная апостериорная оптимизация

I. Введение. Задачи радиопланирования сетей связи с подвижными объектами (транкинговых, сотовых) являются весьма сложными и неоднозначными. Для них невозможно разработать некий универсальный метод расчета, поскольку существует слишком много внешних и внутренних факторов влияния, которые приводят к значительным отклонениям решения. В работе [1] отмечается, что одним из основных факторов является невозможность построения регулярных моделей распространения электромагнитных волн в широком диапазоне частот, на которых работают сети мобильной связи разных поколений. Это обусловлено как физическими закономерностями распространения волн, так и спецификой рельефа, особенно городского. Применяемые для расчетов известные модели (Окамура – Хата, Ли, Икегами, Уолфиша – Икегами и некоторые другие), как правило, нуждаются в существенной коррекции в зависимости от типа рельефа конкретного региона или города. В связи с этим и в рекомендациях Международного союза электросвязи [2] представлены функциональные зависимости лишь медианных значений напряженности поля от ряда параметров, в частности, от процента времени, в течение которого напряженность поля в среднем превышает расчетный уровень. Разброс этих параметров весьма широк. Например, процент времени превышения – от 5% до 50%. В то же время оценить с достаточной точностью вероятности выдерживания расчетного процента и доверительные интервалы крайне сложно.

При переходе к стандартам 3G/4G используют более высокочастотный диапазон, что приводит к дополнительным сложностям радиопланирования в целом и расчета зон радиовидимости:

– сокращается размер сот при использовании более высоких частот из-за физических ограничений на дальность распространения радиоволн, что приводит к увеличению количества базовых станций и каналов передачи;

– увеличивается количество эстафетных передач с уменьшением размеров сот при движении мобильной станции, что снижает вероятность успешного завершения вызова;

– возрастают затраты ресурса сети сотовой связи на управление процессами соединения, эстафетной передачи, сигнализации и синхронизации при движении абонента в зоне с малыми размерами сот;

– в сетях новых поколений планирование покрытия функционально связано с ресурсом пропускной способности [2]. По существу, имеет место обратно пропорциональная зависимость площади покрытия от ресурса пропускной способности (другими словами, от числа обслуживаемых абонентов с гарантированным качеством сервиса). Такая зависимость обусловлена фактором интерференции в условиях использования одного и того же частотного канала для многих пользователей.

Размеры ячеек, при прочих равных условиях, сильно зависят от частотного диапазона сети. По разным оценкам, при переходе от поколения 2G (GSM-900) к поколению 3G/4G диапазона 2 ГГц может потребоваться увеличить число базовых станций (БС) на той же территории в 5...15 раз. В Табл. 1, взятой из работы [4], приведены некоторые геометрические характеристики стандартных ячеек сетей мобильной связи разных поколений (и, соответственно, разных частотных диапазонов).

Характеристики ячеексетей мобильной связи Табл. 1

Частота, МГц	Радиус соты, км	Площадь соты, км ²	Отношение площадей (450)	Отношение площадей (900)
450	50	7850	1,0	0,3
850	30	2826	2,8	0,8
950	27	2289	3,4	1,0
1800	14	615	12,8	3,7
1900	13,3	555	14,2	4,1
2100	12	452	17,4	5,1

Для сетей мобильной связи четвертого поколения, которые будут работать в диапазоне 7 ГГц, размеры ячеек естественно, будут еще меньше, чем для сетей третьего поколения. Кроме того, для организации мобильной связи внутри помещений, на территориях отдельных предприятий и организаций приходится создавать соты малого размера (микро- и пикосоты). Размеры типовых ячеек в сотовых системах связи следующие:

– гипертоты спутниковых систем связи, размер которых может составлять тысячи и десятки тысяч километров;

– макрототы для покрытия городских или сельских зон радиусом в несколько десятков километров;

– микрототы радиусом 100 – 500 м, организуемые, как правило, в местах с интенсивным телефонным обменом – торговых центрах, центральных пешеходных улицах, вестибюлях гостиниц и т.д.;

– пикототы размером 10 – 100 м для связи в помещениях.

В пределах большого города сеть имеет иерархическую структуру, когда соты небольшого размера (микро- или пикототы) дополнительно развертываются внутри сот большего размера.

II. Электродинамические модели распространения волн в сети мобильной мвязи.

Для минимизации затрат на организацию мобильной связи необходимо оптимальным образом рассчитывать местоположение базовых станций, т.е. решать задачи радиопланирования с более высокой эффективностью. Необходимо разрабатывать и применять уточненные методы расчета потерь мощности излучаемого электромагнитного поля, в первую очередь, в условиях плотной городской застройки и внутри замкнутых пространств (помещений). В подобных условиях имеют место следующие эффекты [1]:

- экранирование;
- отражения от крупных объектов;
- преломление в зависимости от плотности среды прохождения;
- рассеивание на препятствиях;
- дифракция на углах, ребрах, клиньях и т.д.;
- замирания и др.

При этом дифракционные составляющие электромагнитного поля, равно как и компоненты рассеянного поля (при многолучевом распространении) могут суммироваться с основным сигналом. Для оптимальной обработки смеси таких сигналов применяют так называемые *Rake*- и *G-Rake*-приемники [5]. Благодаря учету этих составляющих можно довольно заметно повысить мощность результирующего входного сигнала.

С учетом сказанного можно сделать однозначный вывод, что при радиопланировании сетей *3G/4G* крайне важно повышать точность предварительных расчетов, прежде всего, расчетов потерь мощности сигнала, поскольку даже минимальная экономия при высокой плотности размещения БС даст значительный общий выигрыш. Соответственно, необходимо уточнять электродинамические модели рассеяния волн, особенно в условиях города.

Как отмечалось ранее, наиболее перспективный путь достижения поставленной цели – сочетание детерминистских и статистических моделей с применением цифровых карт местности [6, 7]. Для решения задач такого вида необходимо оценивать и учитывать вероятностные характеристики высот, в частности – корреляционные функции (КФ) высот зданий. В общем случае городской ландшафт представляет собой статистически шероховатую поверхность с крупными плавными неоднородностями (складки местности), на которые наложены мелкие неоднородности разрывного типа – здания и сооружения. КФ поверхности в произвольном направлении можно определить по векторной цифровой карте местности [3, 7]. Данные о высотах зданий и расстояниях между ними хранятся в виде атрибутов, привязанных векторным графическим объектам.

На Рис. 1 изображен график корреляционной функции, рассчитанной по данным цифровой карты масштаб 1:10 000.

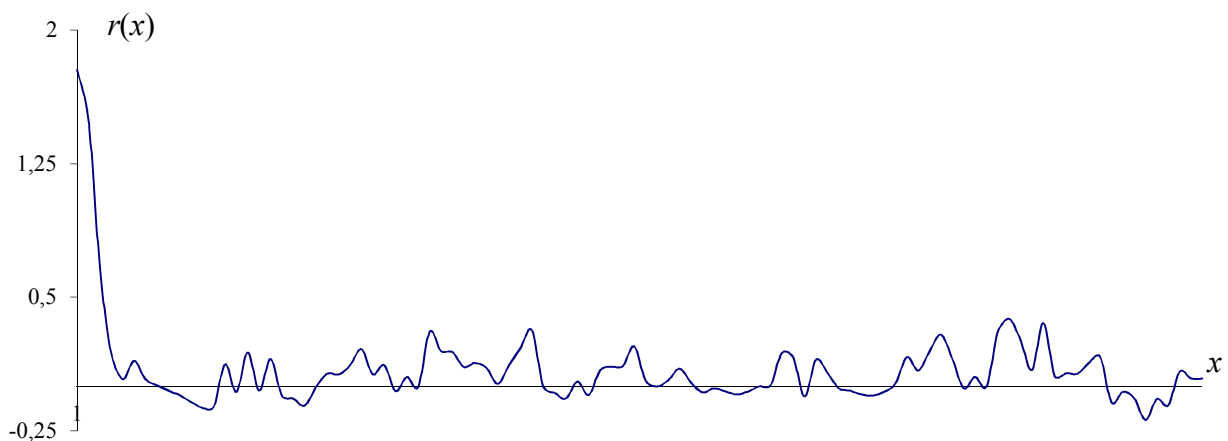


Рис. 1. Корреляционная функция высот поверхности

Основной проблемой при использовании цифровых карт местности является выбор необходимой детальности карты. При недостаточном разрешении отдельные детали изображения сливаются, и тонкая структура КФ теряется. На Рис. 2 изображен график КФ, рассчитанной по данным цифровой карты более мелкого масштаба (1:1000). Видно, что характерные детали, по которым можно оценить вклад составляющих вторичного рассеянного поля, отсутствуют.

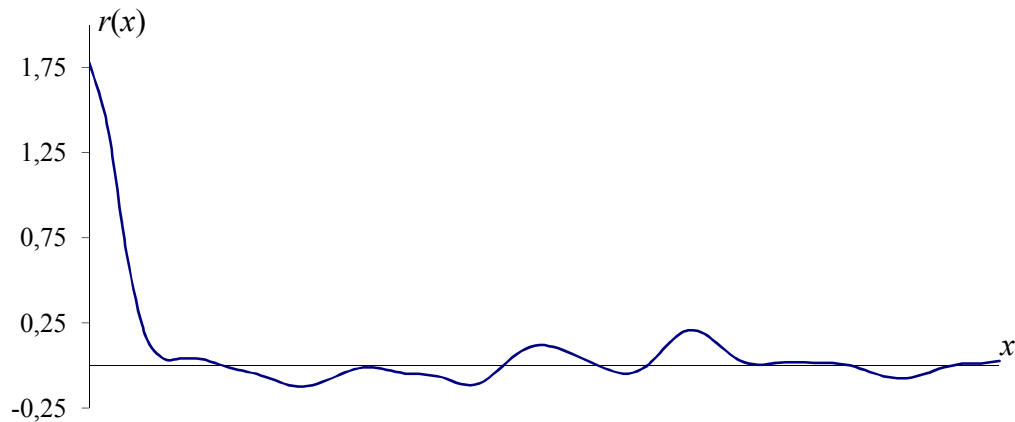


Рис. 2. Корреляционная функция высот поверхности, рассчитанная по данным карты мелкого масштаба

С другой стороны, применение карт слишком крупного масштаба приводит к дроблению цельных объектов и, соответственно, к зашумлению КФ профиля поверхности. На Рис. 3 изображен график КФ, рассчитанной по карте масштаба 1:100 000.

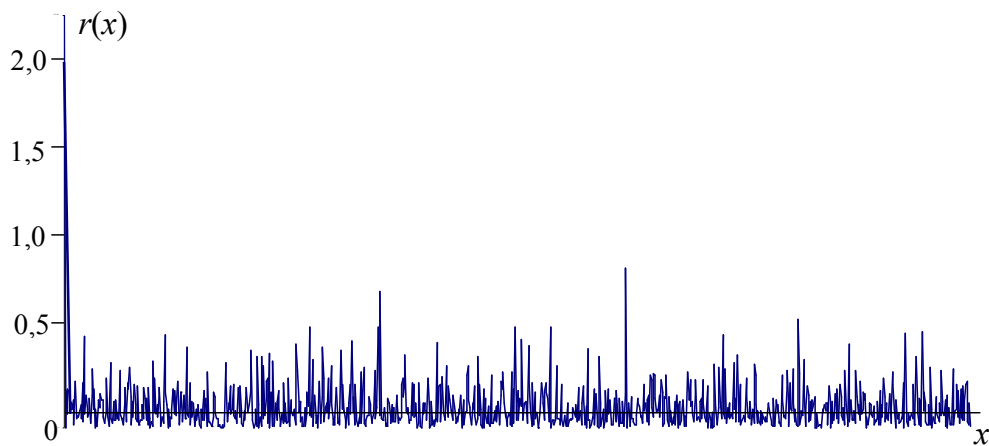


Рис. 3. Корреляционная функция высот поверхности, рассчитанная по данным карты крупного масштаба

По результатам анализа необходимой детальности цифровых карт местности, используемых для задач радиопланирования, можно сделать вывод, что масштаб карты должен быть одного порядка с характерным размером искусственных объектов (зданий и сооружений). В частности, при среднем размере, лежащем в пределах от 10 до 50 м, целесообразно использовать карты масштаба 1:5000 ... 1:10 000.

Задача радиопланирования сети мобильной связи, в том числе и сети 3G/4G, по существу, является задачей оптимального размещения БС, прежде всего, по критерию отношения сигнал/помехи. Однако при оптимизации размещения БС сети 3G/4G в состав целевой функции входит большое количество дополнительных параметров, от которых зависит качество сервиса.

Ключевыми параметрами являются задержка передачи, пропускная способность и потери пакетов. Эти параметры оказывают наибольшее влияние на результирующее качество сервиса, поэтому представляет большой интерес оценка размеров зон обслуживания БС по этим параметрам.

Кроме того, при решении задач радиопланирования большое значение имеет прогнозирование теневых зон и предварительное оценивание вклада дифракционных составляющих в результирующий принимаемый сигнал (особенно в условиях плотной городской застройки). От этих параметров зависят как плотность размещения БС, так и правильность выбора технических характеристик оборудования, в частности, наклона антенн БС.

Отметим, что приведенные соображения носят качественный характер и вытекают из общих положений системного анализа. Для получения количественных оценок необходимо анализировать структуру зданий и сооружений в зоне обслуживания, форму и материал стен, крыш и пр. На основе результатов такого анализа методами, исчерпывающе разработанными и детально изложенными, например, в работе [8], рассчитываются усредненные значения дифракционных составляющих рассеянного поля.

III. Метод построения зон покрытия сетей новых поколений. Для предварительного размещения БС в зоне покрытия применим методику построения так называемой диаграммы Вороного [9, 10], формальное определение которой следующее. Диаграмма Вороного есть кортеж ячеек $D_t(k)_{k \in K}$, связанных с узлом R_k или набор всех точек внутри R_k , расстояние до которых в R_k не больше, чем их расстояние к другим узлам R_j , где j – любой индекс, отличающийся от индекса k . Другими словами, если $r(x, A) = \inf \{r(x, A) | a \in A\}$ означает расстояние между точкой x и подмножеством A , то $D_k = \{x \in X | r(x, R_k) \leq r(x, R_j)\}$ для всех $j \neq k$.

В принципе некоторые из узлов могут пересекаться и даже совпадать, но обычно предполагается, чтобы быть не пересекаются. Кроме того, в определении допускается бесконечное количество узлов, но в практических случаях рассматривается ограниченное число узлов. В частном случае, когда пространство представляет собой конечномерное Евклидово пространство, множество узлов ограничено и координаты всех узлов различны, ячейки Вороного есть выпуклые многогранники.

В качестве иллюстрации (Рис. 4) рассмотрим группу базовых станций (БС) в зоне покрытия.

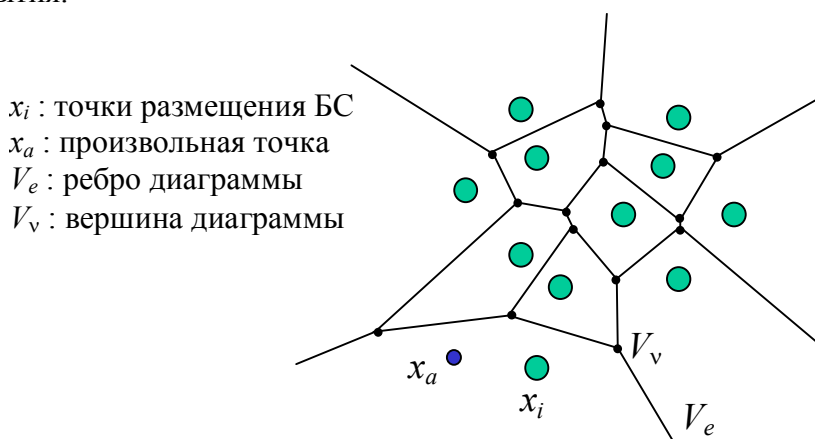


Рис. 4. Ориентировочное размещение БС в зоне покрытия

Необходимо оцінити число абонентів в ячійке. При прочих рівних умовах (об'єм трафіка, вид трафіка, якість сервісу, і т.п.), розумно передположити, що абонент зв'язується з данною БС, находящейся на мінімальному відстані. В даному випадку діаграма Вороного D_k базової станції з номером R_k використовується для орієнтованого розрахунку числа абонентів даної БС (яка моделюється точкою в зоні покриття).

Предполагаючи, що відстані між БС з номерами k і j визначені, використовуємо стандартне відстані, тісно пов'язане з метрикою Евкліда:

$$r_e[(x_k, x_j), (y_k, y_j)] = \sqrt{(x_k - y_k)^2 + (x_j - y_j)^2}.$$

Применительно к рассматриваемой задаче діаграма Вороного D_k представляє собою набір K ячійок з єдиною БС в кожній ячійці. Для произвольной точки x_a , находящейся внутри k -й ячійки, справедливо соотношение вида (4.1), конкретизированное для Евклидовой метрики:

$$r_e[(x_a, x_k), (y_a, y_k)] < r_e[(x_a, x_j), (y_a, y_j)].$$

Если точка x_a лежит на ребре V_e между ячійками x_k и x_j , то круг максимального радиуса с центром в данной точке находится внутри x_k и x_j . Таким образом, ребро V_e представляет собой геометрическое место точек, равноудаленных от центров ячійок x_k и x_j .

При выраженной регулярности ландшафта и размещение БС может иметь достаточно регулярный характер (см. Рис. 5).

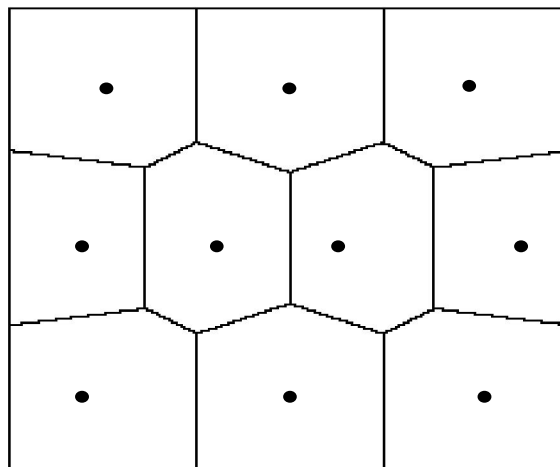


Рис. 5. Схема размещения БС для однородного ландшафта

Для построения диаграммы Вороного чаще всего используют так называемый алгоритм Форчуна [11], основанный на применении заметающей прямой – вспомогательный объект, представляющий собой вертикальную прямую линию. На каждом шаге алгоритма диаграмма Вороного построена для множества, состоящего из заметающей прямой и точек слева от неё. При этом граница между областью Вороного прямой и областями точек состоит из отрезков парабол (так как геометрическое место точек, равноудалённых от заданной точки и прямой – это парабола). Прямая движется слева направо. Каждый раз, когда она проходит через очередную точку, эта точка добавляется к уже построенному участку диаграммы. Добавление точки к диаграмме при использовании двоичного дерева поиска имеет

сложность $O(\log_2 n)$, всего точек n , а сортировка точек по координате может быть выполнена за $O(n \log_2 n)$ операций, поэтому вычислительная сложность алгоритма Форчуна равна $O(n \log_2 n)$.

Для управления эволюцией параболического фронта диаграммы в процессе перемещения заметающей прямой используем сохранение параметров параболы в процессе построения диаграммы. Применим уравнение параболы [13], модифицированное для задачи размещения БС:

$$\alpha_{rc} = y_k \frac{1}{2(x_{kj} - y_{kj})} (x_k^2 - 2x_{kj}x_k + x_{kj}^2 + y_k^2 - y_{kj}^2),$$

где y_{kj} представляет собой линию сканирования в момент наблюдения, а $D_k = (x_k; y_k)$ – точка области Вороного. По координатам данной точки определяется параметр дуги α_{rc} .

Алгоритм построения диаграммы Вороного имеет следующий вид.

1. Вход: выбор множества точек в зоне покрытия.
2. Инициализация дерева событий Q_{et} по всем точкам.
3. Если множество Q_{et} не пусто, шаг 4. Иначе – шаг 9.
4. Рассмотрение точки x_k с максимальной координатой y на множестве Q_{et} .
5. Если x_k – возможная точка размещения, шаг 6. На шаг 7.
6. Фиксация точки x_k . На шаг 8.
7. Управление дугой α_{rc} . На шаг 3.
8. Удаление точки x_k из множества Q_{et} . На шаг 3.
9. Запись параметров диаграммы Вороного. Стоп.

На Рис. 6 показаны этапы построения диаграммы Вороного для ограниченной зоны покрытия.

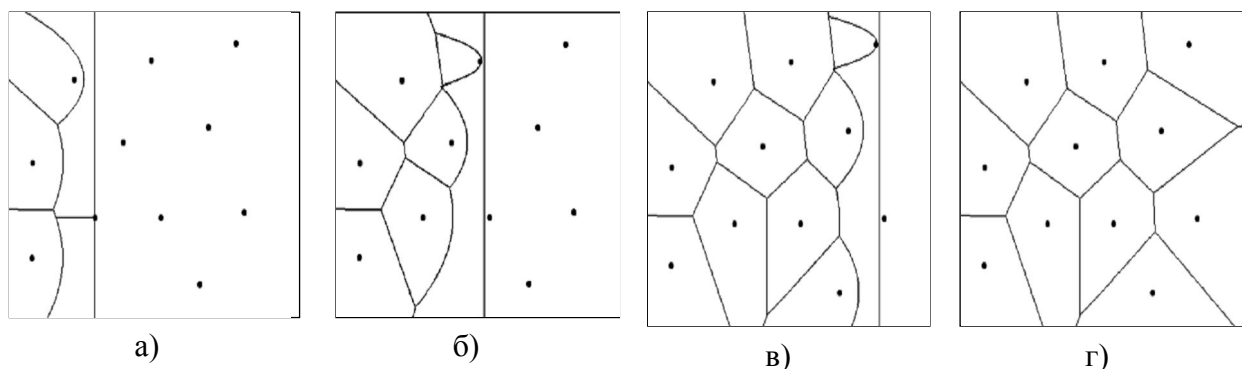


Рис. 6. Этапы построения диаграммы Вороного (а – в) и схема предварительного размещения БС методом построения диаграммы Вороного для участка поверхности (г)

Из-за влияния неоднородностей ландшафта на всей зоне покрытия стандартные шестиугольные соты трансформируются как по размеру, так и по форме.

Следующим этапом построения алгоритма радиопланирования является уточнение местоположения БС с учетом геометрических затенений, вклада дифракционных составляющих и других факторов. Ранее уже упоминалось, что для случая ячеек малого размера условие дальней зоны выполняется не всегда. Более того, падающие лучи нельзя считать параллельными. Поэтому, в отличие от работы [12], здесь, во-первых, учтена расходимость лучей при рассеянии в пределах ячейки, а во-вторых, учтен вклад дифракционных составляющих.

При рассеянии на плавных неоднородностях, радиусы кривизны которых значительно превышают длину волны, поле в области полутени убывает по экспоненте. Поэтому в качестве функций ослабления возьмем ступенчато-экспоненциальные функции вида:

$$\eta[\theta_n, s(x_n, z_n)] = \begin{cases} \eta(\cdot) & \text{при } \operatorname{tg} \theta_n \geq s(x_n, z_n); \\ \exp[\varepsilon(z - z_{kn})] & \text{при } \operatorname{tg} \theta_n < s(x_n, z_n); \end{cases}$$

$$\eta[\theta_p, s(x_p, y_p, z_p)] = \begin{cases} \exp[\varepsilon(z - z_{kp})] & \text{при } \operatorname{tg} \theta_p < s(x_p, y_p, z_p); \\ \eta(\cdot) & \text{при } \operatorname{tg} \theta_p \geq s(x_p, y_p, z_p), \end{cases}$$

где z_{kn} и z_{kp} – точки касания падающей и рассеянной волн соответственно;

$\varepsilon < 0$ – константа, зависящая от радиусов кривизны неровностей и электрических свойств поверхности.

В результате экспериментальных исследований [13, 14] установлено, что КФ высот реальных поверхностей имеют нулевую первую производную при нулевом пространственном сдвиге. Этот вывод используют для обоснования вида КФ на основе феноменологического подхода. В рамках этого подхода в работе [13] для однородной и изотропной поверхности предложена КФ вида

$$r_h(x) = \sigma_h^2 \exp \left[-\frac{|x|}{l_a} + \frac{|x|}{l_a} \exp \left(-\frac{|x|}{l_b} \right) \right],$$

где l_a и l_b – так называемые характеристические длины поверхности.

При $l_a \gg l_b$ КФ на интервале $|x| \approx (2...3)l_b$ достаточно точно аппроксимируется экспоненциальной функцией:

$$r_h(x) \approx \exp \left[-\frac{|x|}{l_a} \right].$$

При $|x| \ll l_b < l_a$ функция $r(x) = r''(0) \frac{x^2}{2}$, что соответствует гауссовской функции, разложенной в ряд Маклорена с удержанием членов до квадратичного включительно. Легко показать, что

$$r'(0) = 0, \text{ а } r''(0) = -\frac{2}{l_a l_b}.$$

Наконец, очень привлекательным свойством данной КФ является именно её двухмасштабность – наличие двух формально независимых параметров l_a и l_b , которые можно варьировать в широких пределах. Это позволяет использовать КФ для широкого диапазона поверхностей с мелкими шероховатостями и крупными неоднородностями, в том числе и искусственного происхождения.

На Рис. 7 и 8 представлены графики одномерных функций затенения без учета и с учетом вклада дифракционных составляющих. Видно, что при малых углах падения, т.е. при скользящем распространении электромагнитной волны вклад дифракционных составляющих становится более заметным и составляет от 5% до 10%. (Напомним, что l_a и l_b – так называемые характеристические длины пространственной корреляции высот поверхности, см. разд. 2).

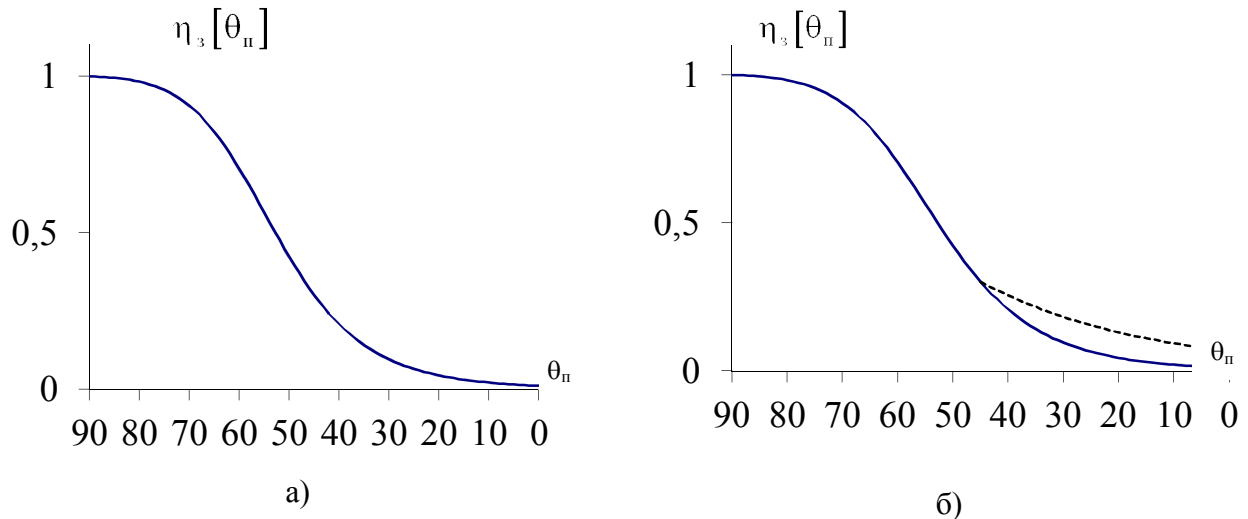


Рис. 7. Одномерные функции затенения при $l_a = 20$ м, $l_b = 10$ м :
 а) без учета дифракции; б) с учетом дифракции

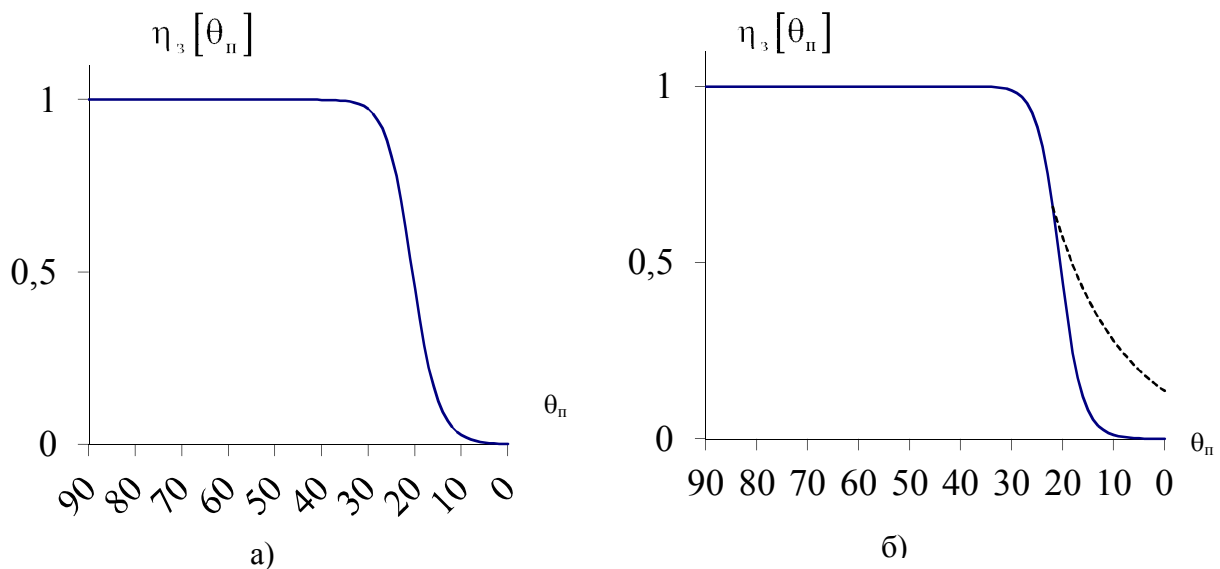


Рис. 8. Одномерные функции затенения при $l_a = 200$ м, $l_b = 1$ м :
 а) без учета дифракции; б) с учетом дифракции

На Рис. 9 и 10 приведены расчетные графики двумерных функций затенения с учетом дифракции при разных углах падения и рассеяния, т.е. когда направление приема не совпадает с направлением падающего луча.

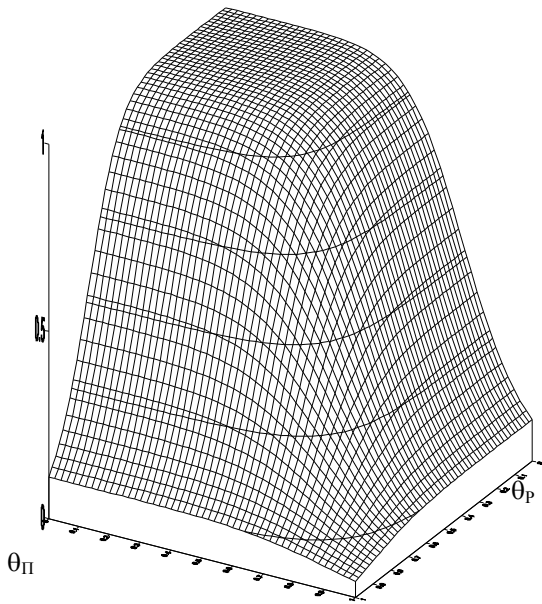


Рис. 9. Функция затенения при

$$l_a = 20 \text{ м}, \quad l_b = 10 \text{ м}$$

θ_{Π} , θ_p – углы падения и рассеяния соответственно

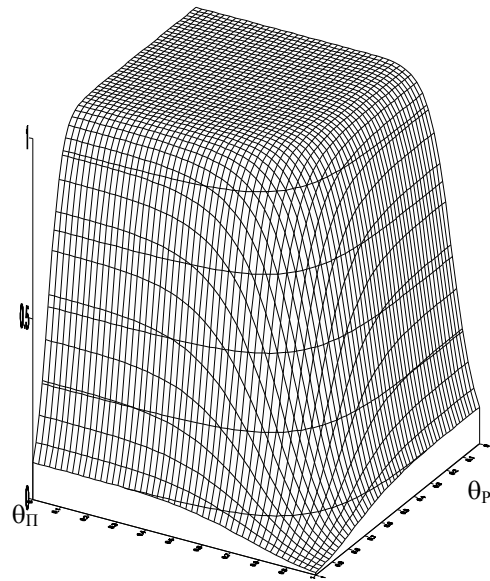


Рис. 10. Функция затенения при

$$l_a = 200 \text{ м}, \quad l_b = 1 \text{ м}$$

VI. Некоторые результаты моделирования и расчетов. С учетом всех приведенных выше соображений выражение для целевой функции поиска минимального числа точек размещения БС [15] принимает следующий вид:

$$J_n = \min \left(\sum_{j=1}^m c_j y_j + \mu_1 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m u_i q_i x_{ij} + \mu_2 \eta[\theta_n, s(x_n, z_n)] + \mu_3 \eta[\theta_p, s(x_p, y_p, z_p)] \right),$$

где x_{ij}, y_j – бинарные переменные;

q_i – вещественные переменные, которыми описывается относительное улучшение модели в процессе уточнения ее параметров (вклада дифракции на препятствиях, корреляции высот поверхности с искусственными вкраплениями и др.);

$0 < \mu_1 \leq 1$ – коэффициент компромисса, выбираемый по данным экспериментов на реальной сети мобильной связи;

μ_2, μ_3 – коэффициенты учета дифракционных составляющих падающей и рассеянной волн соответственно.

Исходные данные для моделирования алгоритмов классического табу-поиска и табу-поиска с локальной апостериорной оптимизацией (LAO Tabu Search) приведены в Табл. 2.

На Рис. 11 изображены графики изменения целевой функции J_n в процессе оптимизации методом классического табу-поиска (кривая 1) и табу-поиска с локальной апостериорной оптимизацией (кривая 2).

В алгоритме с локальной апостериорной оптимизацией реализована концепция баланса между детальным поиском в области перспективных решений и уходом в соседние области для нахождения решений ещё лучшего качества (меньшим значением целевой функции). Однако такой поиск может потребовать большого времени вычислений. Проводя поиск в некоторой перспективной области пространства решений, можно упустить другие, возможно даже более перспективные области. С другой стороны, без углубленного исследования окрестностей хороших решений будем находить только решения невысокого качества.

Исходные данные для моделирования алгоритмов

Табл. 2

№	Параметр	Значение
1	Размер зоны покрытия	10×10 км
2	Общее число абонентов в зоне покрытия (двумерное гауссовское распределение в зоне)	1000
3	Исходное число БС	100
4	Коэффициент расширения спектра S_F	128
5	Коэффициент ортогональности сигнального кода k_{ort}	0,32
6	Отношение сигнал/помехи по восходящему каналу S_{IRU} , дБ	5,4
7	Отношение сигнал/помехи по нисходящему каналу S_{IRD} , дБ	7,2
8	Коэффициент относительного улучшения модели q_i	0,16
9	Мощность внутренних шумов, Вт	$1,8 \times 10^{-14}$

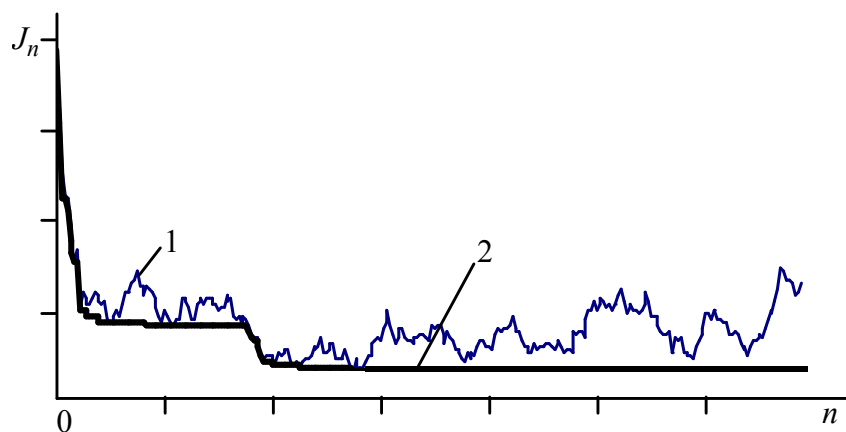


Рис. 11. Изменение модуля результирующей целевой функции в процессе оптимизации. 1 – классический табу-поиск; 2 – табу-поиск с локальной апостериорной оптимизацией

Баланс между углубленным поиском в окрестностях хороших решений и исследованием всего пространства решений для нахождения других перспективных областей сдвигается в ту или иную сторону по результатам предыдущего анализа.

Видно, что во втором случае из рассмотрения практически полностью исключаются локальные экстремумы.

На Рис. 12 изображены графики изменения интегрального компонента целевой функции – общей потребной мощности для обеспечения покрытия с требуемым качеством сервиса – при поиске оптимального размещения одной из БС.

Функция 1 рассчитана без учета дополнительных составляющих вторичного поля рассеяния, обусловленных затенениями, и дифракционных составляющих. Функция 2 рассчитана с учетом этих составляющих. Негладкость кривой 1 объясняется подключением и отключением пользователей в режиме мягкой эстафетной передачи (хэндовера). Кривая 2 более гладкая благодаря суммированию составляющих вторичного поля, которые имеют случайный характер и не зависят друг от друга. Что еще более важно, при учете этих составляющих результирующая потребная мощность БС в среднем уменьшается примерно на 4% – 5%.

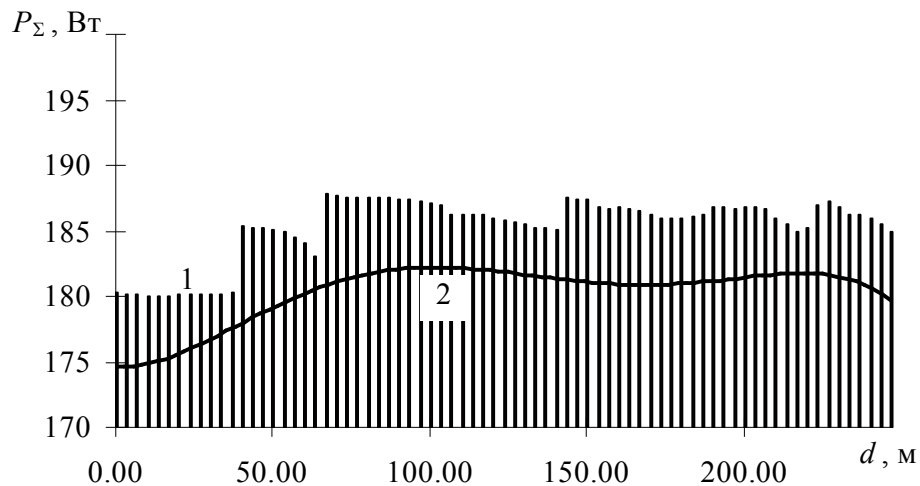


Рис. 12. Изменение параметра целевой функции – общей потребной мощности для обеспечения покрытия с требуемым качеством сервиса при перемещении БС вдоль горизонтальной координаты.

1 – классический табу-поиск; 2 – табу-поиск с локальной апостериорной оптимизацией

Соответственно, после оптимизации размещения экономия БС при учете составляющих вторичного поля является более заметной, что иллюстрируется на Рис. 13. Показано размещение базовых станций на участке размером 3×3 км в центре общей зоны покрытия.

После оптимизации без учета составляющих вторичного поля были определены 63 точки размещения, а с учетом этих составляющих – 59 точек. Учитывая высокую начальную стоимость БС, а также стоимость эксплуатации, можно сделать вывод, что такая экономия является весьма существенной.

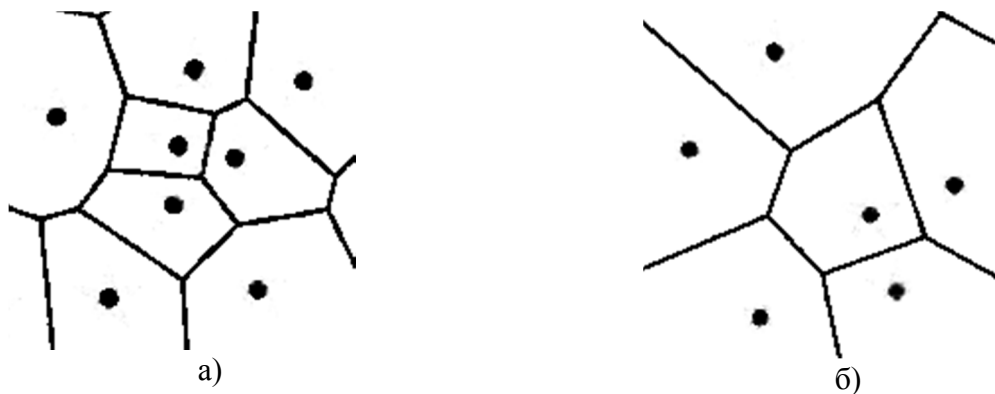


Рис. 13. Сегменты зоны покрытия после оптимизации размещения:
а) без учета геометрических затенений и дифракционных составляющих;
б) с учетом геометрических затенений и дифракционных составляющих

V. Заключение. Благодаря учету компонентов вторичного рассеянного поля в зонах покрытия сети мобильной связи можно сократить число БС без потери качества сервиса. Это важно не только для экономии расходов на установку БС и эксплуатацию сети, но и для уменьшения взаимных помех, снижения вредного влияния электромагнитного излучения.

Алгоритм табу-поиска, модифицированный для решения рассматриваемой задачи, при своей относительной простоте дает достаточную точность решения и имеет приемлемую вычислительную эффективность.

Литература

1. Деревянных А. Е. Сравнительный анализ задач радиопланирования для сетей 2G и 3G / А. Е. Деревянных // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2009. – № 4(12). – С. 58-64.
2. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz // Recommendation ITU-R P.1546-3. – 2001-2003-2005-2007.
3. Дробик А. В. Расчет корреляционных функций высот поверхности для задач радиопланирования сетей мобильной связи третьего поколения / А. В. Дробик, А. Е. Деревянных // Зв'язок. – 2010. – №3. – С. 36-41.
4. Громаков Ю. А. Концепции развития мобильной и беспроводной связи общего пользования / Ю. А. Громаков // «Электросвязь». – 2008. – № 12. – С. 51-57.
5. Adnani N. V. Comparison of model and propagation measurement-based BER performance predictions for Rake receivers in urban microcellular WCDMA systems [Електронний ресурс] / Adnani N. V., Bultitude R. J. C., Hafez R. H. M. // – Режим доступу : [http://www.ursi.org/Proceedings/ProcGA05/pdf/CBA.7\(01060\).pdf](http://www.ursi.org/Proceedings/ProcGA05/pdf/CBA.7(01060).pdf)
6. Милютин Е. Р. Модели расчета потерь мощности сигнала в сотовых системах связи / Е. Р. Милютин // Мобильные телекоммуникации. – 2008. – №4. – С. 24-26.
7. Кондратюк С. В. Методика расчета потерь мощности сигнала в задаче радиопланирования систем мобильной связи новых поколений / С. В. Кондратюк, А. Е. Деревянных // Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні питання регулювання у сфері телекомунікацій та користування радіочастотним ресурсом». – Київ : Національна комісія з питань регулювання зв'язку України, 18-20 травня 2010 р. – С. 69-72.
8. Уфимцев П.Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции / П. Я. Уфимцев. – Москва : Советское радио, 1962. – 343 с.
9. Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия: Введение / Ф. Препарата, М. Шеймос. – Москва : Мир, 1989. – 295 с.
10. De Berg M., Cheong O., van Kreveld M., Overmars M. Computational Geometry: Algorithms and Applications. – 3-d Edition. – Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008. – 386 P.
11. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. – Санкт-Петербург : Питер, 2004. – 560 с.
12. Виноградов Н. А. Метод расчета геометрических затенений при рассеянии волн шероховатой поверхностью / Н. А. Виноградов, В. М. Михайлюк, С. Л. Ровный // Радиотехника и электроника (Известия Академии наук СССР). – 1992. – Т. XXXVII. – № 5. – С. 934-938.
13. Fung A.K. The Correlation Function in Kirchhoff's Method of Solution of Scattering of Waves from Statistically Rough Surfaces / A. K. Fung, R. K. Moore // Journal of Geophysical Research. – June 1964. – Vol. 71. – Nr. 12. – PP. 2939 – 2943.
14. Справочник по радиолокации / под ред. М. Скольника. – Нью-Йорк, 1970. Пер. с англ. (в четырех томах) под общей ред. К.Н. Трофимова. Том 1. Основы радиолокации ; под ред. Я. С. Иццоки. – Москва : Советское радио, 1976. – 456 с.
15. Деревянных А. Е. Комбинированный метод радиопланирования сетей 3G / А. Е. Деревянных // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2011. – № 3(19). – С. 29-37.

Дата надходження в редакцію: 8.04.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. М. А. Виноградов