

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 681.324.50

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ КАНАЛОВ АРХИТЕКТУРНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ СИСТЕМЫ WiMAX В УСЛОВИЯХ ГОРОДА

А. А. СТРЕЛЬНИЦКИЙ, А. Е. СТРЕЛЬНИЦКИЙ, А. И. ЦОПА, В. М. ШОКАЛО

Проведены измерения затуханий радиоволн вдоль уличных радиоканалов центрального района г. Харькова. Измерения проводились на частоте 3,5 ГГц с помощью базовой станции WiMAX и созданной авторами мобильной лаборатории. Выполнен всесторонний анализ полученных результатов — выяснены механизмы формирования распределений поля вдоль улиц и даны рекомендации по разработке подхода к их расчету.

Radiowaves attenuation measurements along street radio channels of the central district of Kharkov are carried out. Measurements were taken at the frequency of 3,5 GHz by means of the base station WiMAX and the mobile laboratory created by writers. The multifold analysis of the obtained results is made — field distribution formation mechanics along streets are clarified and references on the approach development to their calculation are given.

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование беспроводных цифровых систем передачи информации (ЦСПИ) во многом основано на проектировании радиоканала. Достоверная модель радиоканала, как известно из [1, 2], всегда опирается на эксперимент.

Для случая ЦСПИ с WiMAX-технологией уже появился ряд статей [3, 4], в которых освещены некоторые вопросы распространения радиоволн (РРВ) в условиях города. В итоге выяснены, например, виды модуляции, которые свойственны тем или иным уровням соотношения сигнал/шум (S/N) в пункте приема. Однако описанные в упомянутых работах экспериментальные результаты, носят частный характер. Они не могут быть использованы для построения общей модели РРВ в беспроводных каналах WiMAX сетей как по причине ограниченного числа проведенных экспериментальных исследований, так и в силу отсутствия их систематизации по какому-либо признаку. В частности, практически не изучен механизм распространения радиоволн по городским волновым каналам архитектурных сооружений (ВКАС). Эта терминология введена в [5].

Расширение знаний о законах распространения радиоволн по ВКАС беспроводных сетей с WiMAX технологией, особенно по городским улицам, актуально в связи с введением в эксплуатацию в ближайшей перспективе мобильных систем WiMAX и сопряжено с необходимостью проведения обширных экспериментов. Часть из них выполнена в рамках представленного исследования.

Цель работы состояла в проведении опытов и анализе их результатов при распространении по уличным ВКАС сигналов ЦСПИ с технологи-

ей WiMAX в условиях большого промышленного центра (г. Харьков).

1. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Карта части города Харькова, в которой выполнялись исследования, приведена на рис. 1.



Рис. 1

Для проведения измерений была создана мобильная лаборатория, общий вид которой показан на рис. 2, а структура — на рис. 3.

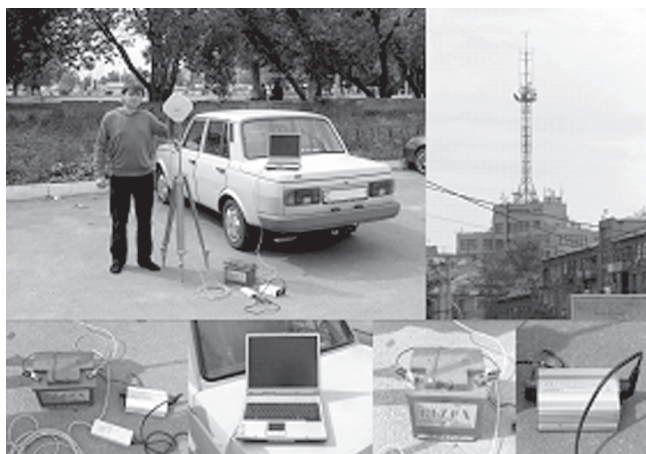


Рис. 2

В состав мобильной лаборатории входит следующее оборудование: абонентская станция (АС) WiMAX Breeze-Max 3500 (Alvarion), ноутбук «Asus», GPS приемник NovAtel SS-11, преобразователь напряжения ПН — 12В/220В, аккумуляторная батарея АКБ — 12В. Для измерения соотношения сигнал/шум (S/N) и уровня сигнала (S) использовался специальный программный интерфейс, предоставленный фирмой «Альтернет», который показывает параметры качества соединения относительно уровня сигнала, излученного базовой станцией [6]. В г. Харькове базовая станция (БС) WiMAX работает в диапазоне 3,5 ГГц и установлена на высоте $h_{БС} = 80$ м. (здание Госпром, на рис. 2 правый снимок).

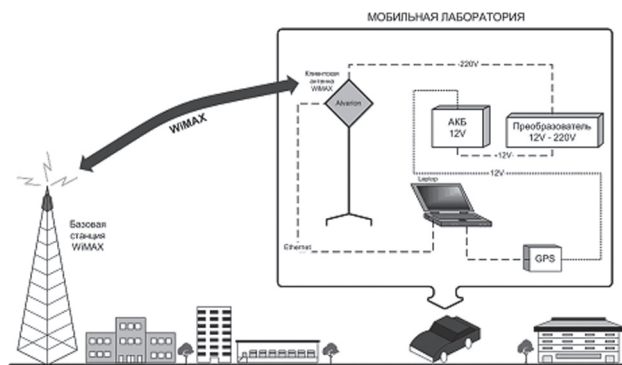
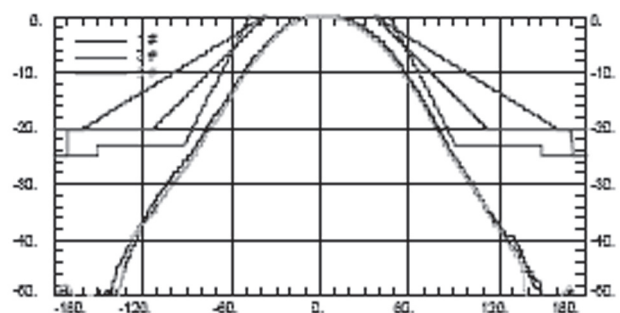


Рис. 3

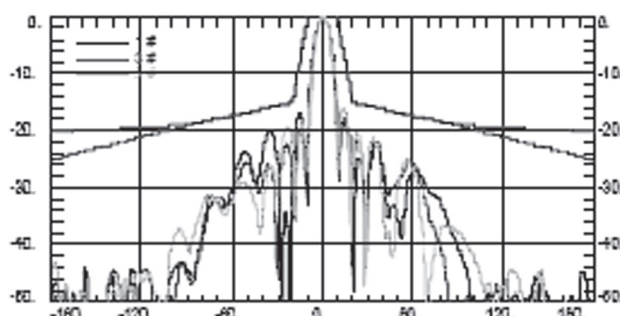
В БС применяется четырехсекторная антенна. Один из секторов диаграммы направленности (ДН) (см. рис. 4, а) обслуживает район, показанный на карте (рис. 1), причем направление максимума излучения практически совпадает с направлением (ориентацией) проспекта Ленина.

Опишем проведенные опыты, результаты которых приведены на рис. 5–8. Опыт первый — измерения вдоль максимума ДН базовой станции (вдоль проспекта Ленина). Результаты экспериментов в виде зависимостей $S(r)$ и $S/N(r)$ приведены на рис. 5 а, б. При опытах максимальное расстояние r равнялось 4 км, что соответствовало максимальной дальности уверенной связи. Здесь точками показаны данные разовых измерений при

эталонном расстоянии $r_0 = 100$ м и с шагом 100 м. В каждой точке измерений апертура антенны абонентской станции (АС), закрепленная на штативе (рис. 2), устанавливалась перпендикулярно направлению максимального приема на высоте 1,5 м над уровнем уличного покрытия. Первичные данные измерений усреднялись и сглаживались с помощью пакета «Origin 6.1». Обработанные результаты в виде сплошных кривых показаны на рис. 5 а, б. Эти же кривые совместно изображены на рис. 5 в. Здесь также показан характер изменений видов модуляции сигнала вдоль трассы. На оси расстояний показаны отрезки с тем или иным видом модуляции (QPSK 1/2, BPSK 3/4, BPSK 1/2).



а



б

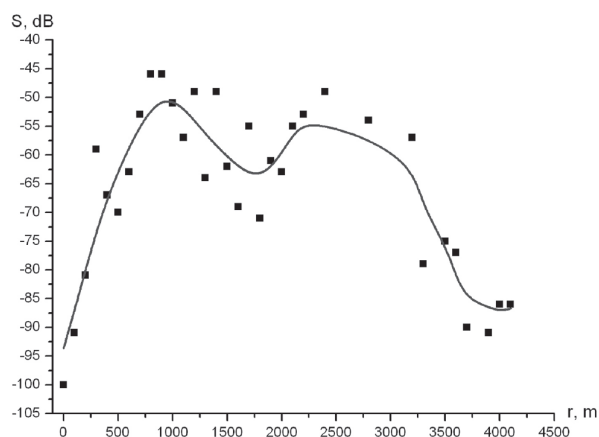
Рис. 4:

а — ДН антенны БС; б — ДН антенны АС

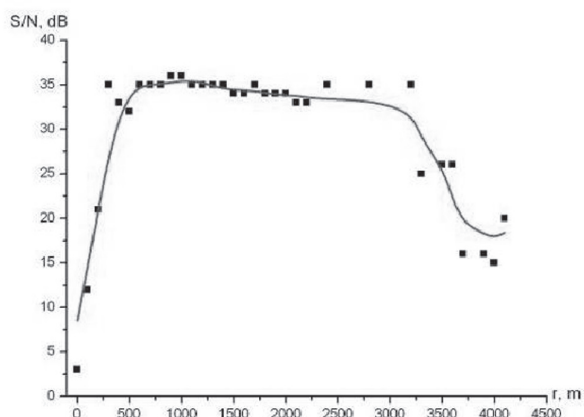
Известно, что аппаратура WiMAX является адаптивной и позволяет поддерживать постоянную скорость передачи (или S/N) цифрового потока при уменьшении уровня сигнала [7].

Из представленных данных следует, что при $S < -65$ дБ адаптация не работает и соотношение S/N убывает с расстоянием с такой же скоростью, как и уровень сигнала. Полученный результат существенно уточняет возможности системы WiMAX по адаптации, так как в [7] показано, что нижним пределом адаптации является уровень сигнала -75 дБ.

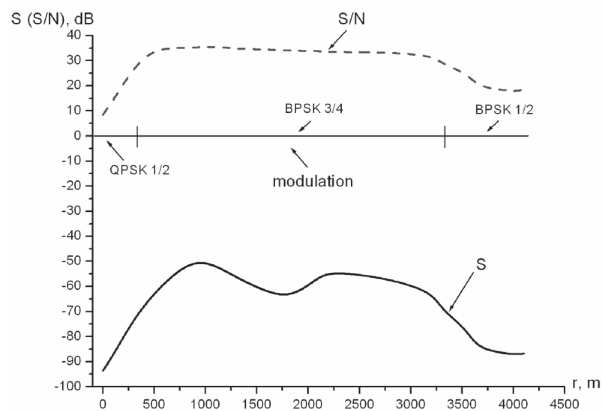
В тоже время полученные данные по характеру изменений видов модуляции на трассе хорошо коррелируют с результатами, приведенными в [8] (см. рис. 5 в, б). Анализируя их совместно с данными проведенного эксперимента, можно прийти к выводу, что в исследуемой части г. Харькова передача информации по системе беспроводной связи WiMAX осуществляется со скоростью 1-2 Мбит/с.



а



б

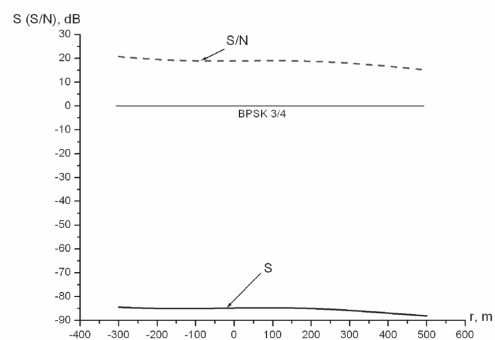


в

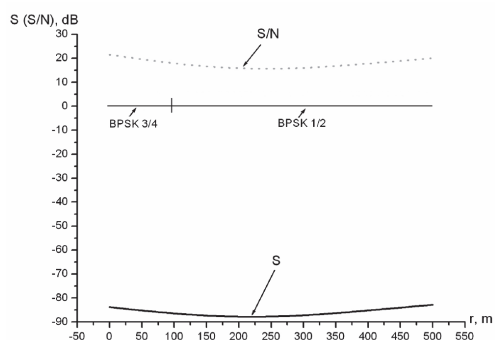
Рис. 5

Расстояния, показанные на рис. 6 а–г, измерялись от точек H в направлении стрелок (см. рис. 1). При этом главный максимум ДН абонентской станции (см. рис. 4, б) устанавливался под углом 90° к направлению максимального излучения БС. По этой причине уровень сигнала падал на 30 дБ, относительно его уровня на проспекте Ленина, что соответствует значению ДН при $\Theta = 90^\circ$.

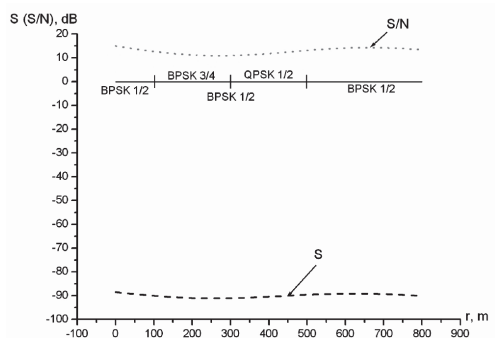
В технологии радиодоступа WiMAX на базовой станции используются секторные антенны с широкой диаграммой направленности (рис. 4, а), а абонентские станции имеют встроенную антенну с узкой диаграммой направленности и малым уровнем приема заднего лепестка (рис. 4, б) [9].



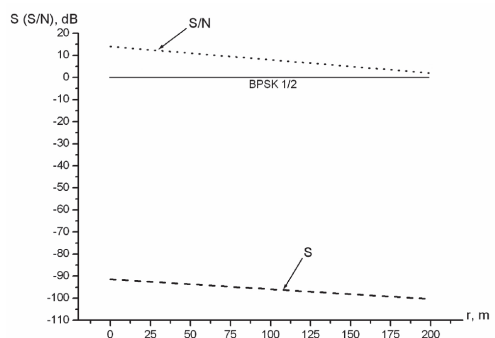
а



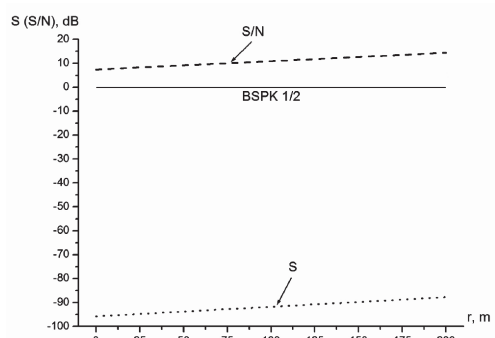
б



в



г



д

Рис. 6

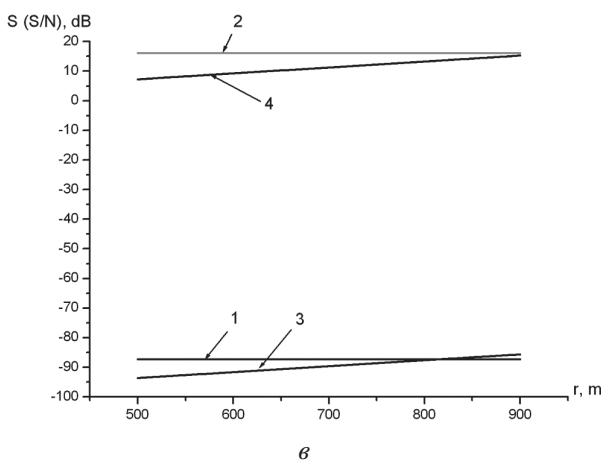
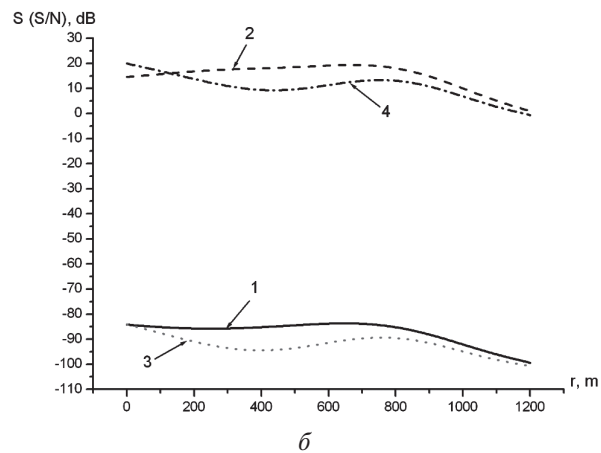
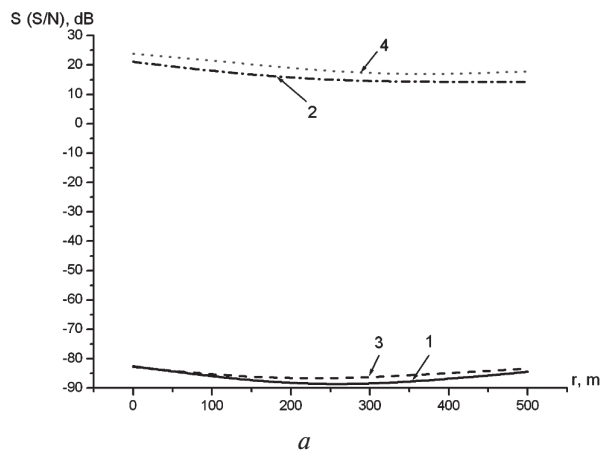


Рис. 7

Эта особенность аппаратуры WiMAX позволяет предложить новую методику экспериментального доказательства существования волновых каналов и сравнения уровней сигналов S и отношений сигнал/шум S/N , созданных в точке приема за счет различных механизмов распространения.

Рассмотрим рис. 9. Здесь БС расположена на продольной по рисунку улице. Тогда в предположении наличия волновых каналов, в поперечной улице, образованной ансамблями домов Д1 и Д2, должно возникнуть два потока волн (указаны на рис. 9 стрелками). Эти потоки являются бегущими волнами, движущимися навстречу друг другу. Они интерферируют, образуя смешанную волну.

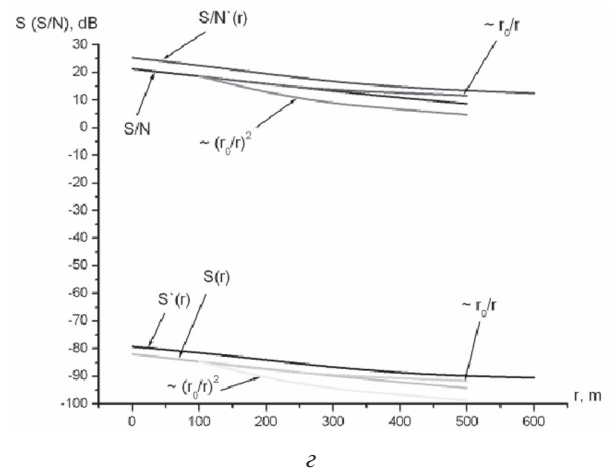
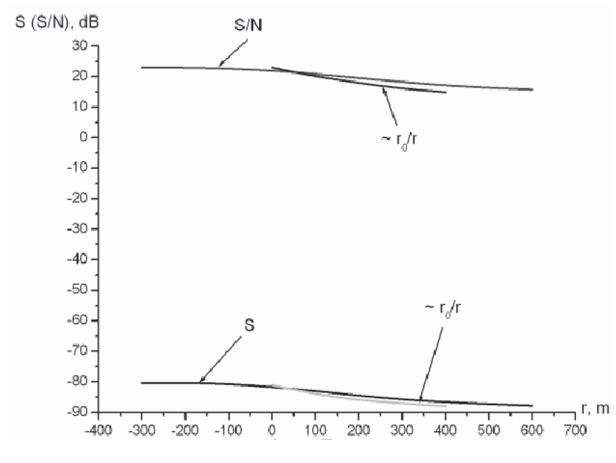
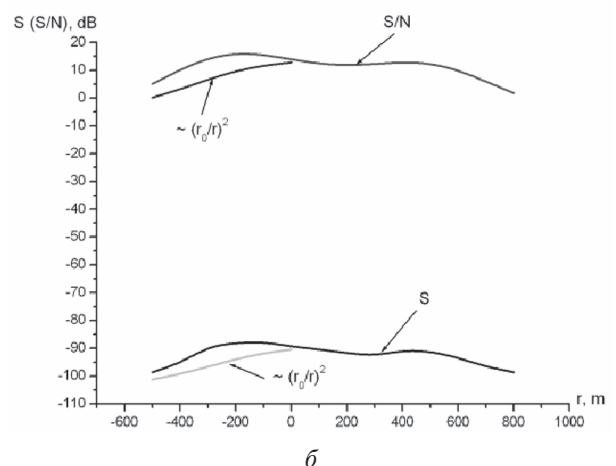
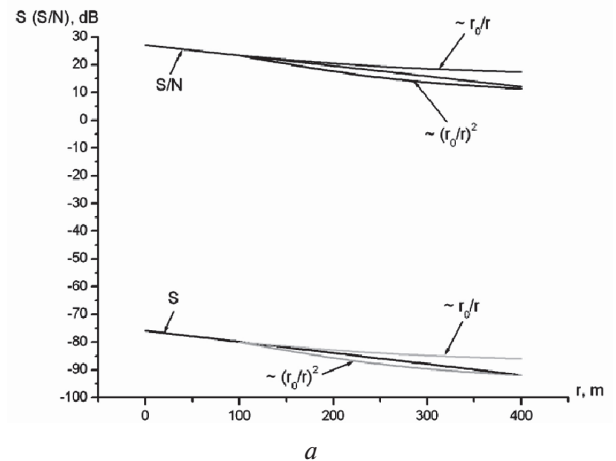


Рис. 8

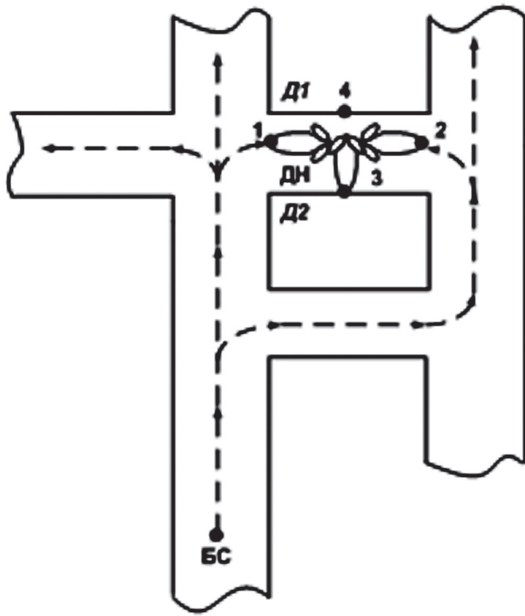


Рис. 9

Из приведенного описания следует такая методика измерений. Диаграмма направленности приемной антенны направляется максимумом в точку 1 (рис. 9), регистрируя, таким образом, поток энергии, движущийся из точки 1 в точку 2. Затем максимум ДН направляется в точку 2 и регистрируется обратный поток энергии. Наличие обоих потоков свидетельствует о существовании волнового канала. Ориентируя максимум ДН в точку 3 или 4 (точки на стенах ансамблей домов), можно зарегистрировать интенсивность сигнала, образованного за счет дифракционного распространения радиоволн.

Новизна предложенной методики по сравнению с известными работами (например, [10]) заключается в том, что за счет применения антенны с узкой ДН удастся выявить направление движение потоков энергии вдоль улиц и разделить вклады различных механизмов РРВ в уровень принимаемого сигнала.

Экспериментальные исследования по предложенной методике проведены в одном из четырех секторов работы БС.

Результаты измерений уровней сигнала S и сигнал/шума S/N на рис. 7. Здесь кривые 1 и 3 — это зависимости отношения S/N и интенсивности сигнала S соответственно вдоль улицы при движении от точки 1 в точку 2, а кривые 2, 4 — те же кривые только измеренные при движении автомобиля в обратном направлении.

Исходя из предыдущих рассуждений, нетрудно заключить, что в исследуемом случае действует механизм РРВ по ВКАС. Как и ранее, измерения проводились при высоте приемной антенны $h_{AC} = 1,5$ м над уличным покрытием. Дальнейшие опыты показали, что интенсивность сигналов в точках 1 и 3 отличаются на $(10 \div 15)$ дБ, т. е. вклад в интенсивность сигнала механизма дифракции

более чем на порядок меньше, чем механизма РРВ по ВКАС.

Установленный факт интерференции встречных потоков волн в уличных каналах при наличии дифракционной составляющей поля позволяет пояснить закономерность изменения затухания сигнала вдоль улиц. На рис. 8 показаны результаты измерений уровней сигнала и сигнал/шума на ряде улиц совместно с кривыми убывания величин S и S/N по законам $\left(\frac{r_0}{r}\right)^2$ или $\frac{r_0}{r}$. Нетрудно видеть, что экспериментальные кривые убывают медленнее, чем $\left(\frac{r_0}{r}\right)^2$ (рис. 8, а, б, г) или даже чем $\frac{r_0}{r}$ (рис. 8, в). Эти зависимости, как известно из [11], характерны для зон Френеля и Релея при РРВ над отражающей поверхностью.

Снижение степени убывания уровня плотности потока мощности сигнала Π в эксперименте по сравнению с выше указанным случаем поясним следующим образом. Для простоты положим, что фазировка двух интерферирующих в уличном коридоре потоков и дифракционной составляющей поля такова, что векторную сумму можно заменить алгебраической. Тогда выражения для плотности потока мощности в уличном канале можно легко записать так

$$\Pi(r) = \Pi_{\max} \left[\frac{1}{k^n} + \frac{M(l)}{[l - (k-1)]^n} + L(r) \right] = \Pi_{\max}^0 \cdot \alpha(r). \quad (1)$$

В (1) обозначено: $\Pi_{\max}$ — максимальная плотность потока мощности в точке 1, при $r = r_0$ и движении энергии в сторону точки 2 (рис. 9); $k = 1, 2 \dots l$, где l — количество участков разбиения улицы длиной $l \cdot r_0$; $M(l) = \Pi_{\max}(l) / \Pi_{\max}(r_0)$, где $\Pi_{\max}(l)$ — максимальное значение плотности потока мощности в точке 2 при движении энергии в сторону точки 1 (рис. 9); $L(r) = \Pi_d(r) / \Pi_{\max}$, где $\Pi_d(r)$ — плотность потока мощности в уличном радиоканале за счет дифракции.

На рис. 10 приведены расчеты величины $\alpha(r)$ при $l = 10$, $M = 0.1$ и в предположении, что $L(r) = \text{const} = 0.1$, а $n = 2$. Кривая $\alpha(r)$ на спадающем участке хорошо описывается функцией $\left(\frac{r_0}{r}\right)^{1.5}$.

В зависимости от значений $M \in [0, 1]$ и l закономерность измерения распределения поля вдоль конкретной улицы может описываться либо обратной степенной функцией (см. результаты эксперимента на рис. 8, а) или полиномом степени n (см., например, рис. 7, а).

Проведем сравнение полученных результатов с более ранними данными других исследователей. Полученные нами экспериментально распределения полей вдоль уличных ВКАС по характеру функциональных зависимостей хорошо совпадают

с данными работы [9]. Здесь тоже проведены измерения затуханий радиоволн в уличных каналах (г. Оттава), только на частоте 900 МГц и с помощью ненаправленных антенн. Получены такие результаты.

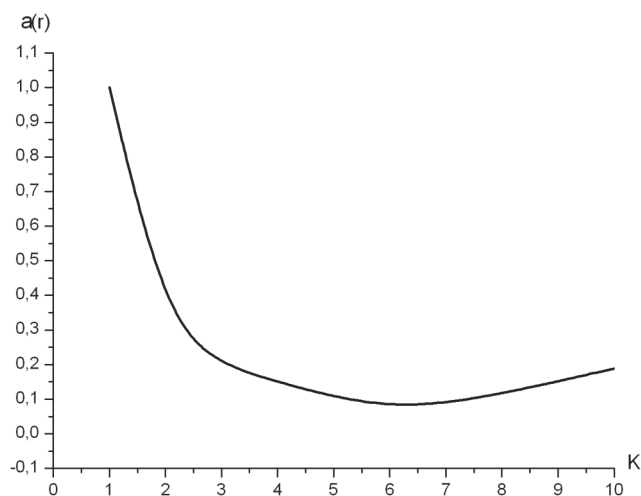


Рис. 10

Вдоль улиц, которые не имеют пересечения с другими улицами, величина затуханий является спадающей функцией расстояния (сравни с рис. 8, *з*). Если улица пересекается несколькими улицами, то распределение $\alpha(r)$ по ней имеет несколько интерференционных максимумов (сравни с рис. 7, *б*, 8, *б*), появление которых легко поясняется выше описанным взаимодействием двух или нескольких потоков волн, движущихся навстречу друг другу в уличных каналах.

Другим доказательством достоверности полученных результатов эксперимента являются данные повторных измерений, приведенные на рис. 8, *з* (обозначенные штрихом). Эти опыты проводились через неделю после первых экспериментов. Качественный характер полученных кривых полностью совпадает в обоих случаях.

Таким образом, для ВКАС различных частот микроволнового диапазона свойственны процессы интерференции, приводящие к образованию смешанных волн. Математическое описание этих волн хорошо разработано в теории микроволновых цепей, которую и рекомендуется авторами применять для расчета уличных ВКАС без учета дифракционной составляющей поля. Другое доказательство целесообразности исследуемого подхода к расчету ВКАС приведено авторами в [5].

ВЫВОДЫ

1. Впервые для города Харькова создана модельная лаборатория на основе абонентской станции WiMAX и проведены измерения закономерностей РРВ по уличным ВКАС. Выяснено, что скорость передачи информации действующей в городе системой WiMAX не превышает 2 Мбит/с при дальности не более 4 км.

2. Получены новые данные о возможностях адаптации в системе WiMAX по поддержанию постоянной скорости передачи. Показано, что адаптация этой системы осуществляется, если уровень сигнала выше -65 дБ (раньше декларировался нижний предел при -75 дБ [7]).

3. С использованием свойства высокой направленности антенны клиентского адаптера WiMAX предложена новая методика обнаружения уличных волновых каналов и выделения дифракционной составляющей поля. С помощью этой методики доказано доминирующее существование ВКАС в центральном районе города Харькова и показано, что уровень дифракционной составляющей не превышает 10 дБ при выбранных условиях измерений ($h_{BC} = 80$ м, $h_{AC} = 1,5$ м и малоэтажной застройки района измерений).

4. Показано, что закономерности распространения поля вдоль улиц города в основном предопределены интерференцией двух и более волн. Дано вербальное описание этого процесса и путем сравнения с результатами [9] показано, что это описание справедливо для случаев измерений в разных городах и на разных частотах микроволнового диапазона.

5. Сделан вывод, что выявленные при анализе экспериментальных результатов зависимости РРВ вдоль уличных каналов характерны для микроволновых цепей, что предполагает возможность их использования хорошо развитой теории для построения модели ВКАС.

Литература.

- [1] Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. Учебное пособие. — М.: Изд-во «Наука», 1973. — 607 с.
- [2] Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е издание. : Пер. с англ. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. — 1104 с.
- [3] Fabricio L. F., P. Cardieri. Coverage Prediction and Performance Evaluation of Wireless Metropolitan Area Networks based on IEEE 802.16 // JOURNAL OF COMMUNICATION AND INFORMATION SYSTEMS, VOL. 20, NO. 3. — 2005. — P. 132-140.
- [4] Zou Wei. Capacity Analysis for Multi-hop WiMAX Relay // Proc. International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (IEEE WiCOM). — China. — 2007.
- [5] Стрельницкий А.А., Стрельницкий А.Е., Цона А.И., Шокало В.М. Модель многополюсника для расчета затуханий радиоволн в волновых каналах архитектурных сооружений (модель ХНУРЭ — ВКАС) // 17-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии КрыМиКо-2007», Севастополь: СевНТУ, 2007, — с. 213-214.
- [6] BreezNET B System Manual. SW Version 4.0. — Alvarion. — 2007. — P.157.
- [7] Balvinder B., R. J. Eline, L. M. Franca-Neto. RF System and Circuit Challenges for WiMAX // Intel® Technology Journal, Volume 08, Issue 03, — 2004. — P. 189-201.

- [8] Presentation «Giornata di studio sulla Tecnologia WiMAX». — Ericsson. — 2006.
- [9] *Святкин В.С. и др.* WiMAX — технология беспроводной связи: основы теории, стандарты, применения. / Под ред. В.В. Крылова. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 368 с.: ил.
- [10] PhD Thesis: *D. Porrat*, Radio Propagation in Hallways and Streets for UHF Communications, — 2002, — P. 130.
- [11] *Стрельницкий А.А., Стрельницкий А.Е., Цопа А.И., Шокало В.М.* Вариант модели расчета затуханий широкополосного сигнала в радиолинии локальной сети связи (модель ХНУРЭ Wi-Fi) // 17-ая Международная Крымская конференция «СВЧ—техника и телекоммуникационные технологии КрыМиКо—2007», Севастополь: СевНТУ, 2007. — С. 215-217.

Поступила в редколлегию 26.02.2008



Стрельницкий Александр Евгеньевич, старший преподаватель кафедры основ радиотехники ХНУРЭ. Область научных интересов: компьютерные сети с радиодоступом, системы технической защиты информации.



Цопа Александр Иванович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры РЭС ХНУРЭ. Область научных интересов: исследование, проектирование и разработка цифровых систем передачи информации на основе xDSL технологий.



Стрельницкий Алексей Александрович, старший преподаватель кафедры основ радиотехники ХНУРЭ. Область научных интересов: беспроводные технологии передачи информации, сети и системы с радиодоступом.



Шокало Владимир Михайлович, доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой основ радиотехники Харьковского национального университета радиоэлектроники. Область научных интересов: антенны, микроволновая техника, информационно-измерительные системы.