

УДК 621.391.812.3 + 004.414.2

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН НАД ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ РАСЧЁТАХ УРОВНЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В СИСТЕМАХ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ*Статья поступила в редакцию 04.10.2017, в окончательном варианте – 20.10.2017.*

Пищин Олег Николаевич, Астраханский государственный технический университет, 414025, Российская Федерация, Астрахань, ул. Татищева, 25,
кандидат технических наук, e-mail: o.pishin@yandex.ru

Бестаева Наталия Викторовна, Астраханский государственный технический университет, 414025, Российская Федерация, Астрахань, ул. Татищева, 25,
магистрант, e-mail: nat.bestaeva@yandex.ru

Зубова Анастасия Дмитриевна, Астраханский государственный технический университет, 414025, Российская Федерация, Астрахань, ул. Татищева, 25,
магистрант, e-mail: zubovaanastasia33@gmail.com

Орлова Анна Андреевна, Астраханский государственный университет, 414040, Российская Федерация, Астрахань, ул. Татищева, 20а,
магистрант, e-mail: anna.a_orlova@mail.ru

При проектировании систем мобильной радиосвязи (СМР) необходим адекватный учет уровней затухания радиосигналов (УЗР), распространяющихся над различными поверхностями. При этом модели для УЗР, распространяющихся над водной поверхностью (ВП) и в других условиях существенно различаются. Для построения модели УЗР, распространяющихся над ВП в системах сотовой связи (СС) автором были проведены соответствующие экспериментальные исследования. Для проведения измерений в натуральных условиях использовалось профессиональное измерительное оборудование: Drive Test Agilent E7475A - интегрированная измерительная система для анализа радиопокрытия в сетях СС. На основе проведенных измерений предложена модель, которая может быть использована для расчетов распространения радиоволн в системах СС над ВП, в т.ч. и в рамках применения САПР для СМР. Получен погонный коэффициент для расчёта затухания сигналов СС над ВП, упрощающий проведение предварительных расчетов при проектировании СМР. Представлены результаты сравнительного анализа УЗР в УВЧ диапазоне для различных типов подстилающей поверхности (свободное пространство, сельская местность, ВП). Сделан вывод, что учет пониженных УЗР при распространении их над ВП позволяет оптимизировать размещение приемопередающих станций в СМР.

Ключевые слова: системы мобильной радиосвязи, распространение радиоволн, математические модели, затухание уровня сигнала, подстилающая поверхность, водная поверхность, калибровка моделей, проведение расчетов, использование в САПР.

ANALYSIS OF MODELS OF RADIOWAVE PROPAGATION OVER WATER SURFACE AND USE OF THEM WHILE CALCULATING LEVEL OF ELECTROMAGNETIC FIELD IN THE MOBILE RADIO COMMUNICATION SYSTEMS*The article has been received by editorial board 04.10.2017, in the final version – 20.10.2017.*

Pishchin Oleg N., Astrakhan Technical State University, 25 Tatishchev St., Astrakhan, 414025, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), e-mail: o.pishin@yandex.ru

Bestaeva Natalia V., Astrakhan Technical State University, 25 Tatishchev St., Astrakhan, 414025, Russian Federation,

graduate student, e-mail: nat.bestaeva@yandex.ru

Zubova Anastasia D., Astrakhan Technical State University, 25 Tatishchev St., Astrakhan, 414025, Russian Federation,

graduate student, e-mail: zubovaanastasia33@gmail.com

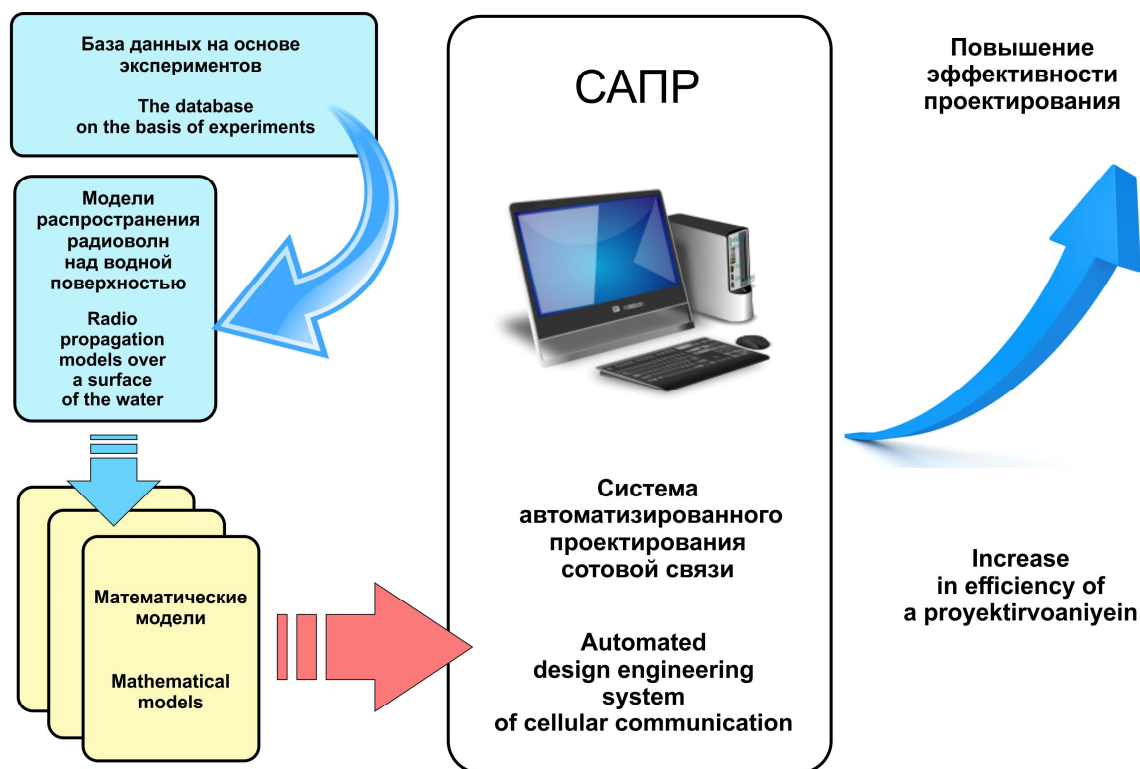
Orlova Anna A., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414040, Russian Federation, graduate student, e-mail: anna.a_orlova@mail.ru

Designing mobile radio communication systems (MRCS) one needs adequate accounting of levels of attenuation of radio signals propagating over different surfaces. At the same time, models of attenuation levels of radio signals propagating over water surface (WS) and those in other conditions significantly differ. To create the model of attenuation levels of radio signals propagating over WS in cellular communication systems (CCS) the author has conducted the related pilot study. To make in situ measurements the professional measuring equipment was used, exactly Drive Test Agilent E7475A, which is the integrated measuring system for analysis of radio covering in cellular communication systems. On the basis of measurements made there was suggested a model which can be used for calculating radio wave propagation in cellular communication systems over WS, as well as for CAD system for MRCS. It was obtained a running coefficient for calculating attenuation of cellular communication signals over WS, which simplifies carrying out preliminary calculations while designing MRCS. There are presented

results of comparative analysis of levels of radio signals attenuation in UHF range for different types of underlying surface (free space, rural area, water surface). It was made a conclusion that taking into consideration decreased levels of radio signals attenuation while they are propagating over WS lets optimize allocation of receive/transmit stations in MRCS.

Keywords: mobile radio communication systems, radio wave propagation, mathematical models, radio signal attenuation, underlying surface, water surface, calibration of models, measurement making, use in CAD systems

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Современный этап развития систем мобильной радиосвязи (СМР), характеризуется высокой степенью внедрения инноваций и, одновременно, растущими требованиями потребителей к уровню качества и объёму предоставления услуг. Быстрый потребительский рост на услуги СМР определяется следующими факторами: активное использование мобильными пользователями не только голосовой связи и СМС-сообщений, но и доступа к Интернет-ресурсам; широкое применение систем позиционирования на местности, основанных на использовании систем сотовой связи (СС); применение систем дистанционного мониторинга состояния здоровья мобильных пациентов, входящих в группы риска; сбор данных и управление коммунальными системами городов с использованием СМР. Таким образом, совершенствование СМР оказывает серьезное влияние на развитие и использование информационно-коммуникационных технологий по целому ряду направлений.

Отметим также активную политику операторов СМР на потребительском рынке в условиях значительной конкуренции между ними, в т.ч. увеличение количества и функциональности приложений (сервисов), требующих всё больших ресурсов – как от беспроводной сети, так и от самих мобильных устройств.

СМР второго поколения были достаточно сложны в отношении их практической реализации и до внедрения стандартов третьего и четвёртого поколения связи. Однако, современная иерархичность СМР и многогранность управления её параметрами требуют проведения оптимизации уже организованных технических систем; систем-надстроек или решений, взаимно заменяющих некоторые технологии внутри сети одного оператора.

Вопросы оптимизации и предварительного проектирования СМР (например, [2, 6, 13, 29]), а также работы в области управления качеством и устойчивостью связи [3, 11, 16, 21] охватывают широкий спектр методик расчёта затухания для различных типов местности (город, пригород, сельская местность, открытая местность) [19, 23]. В частности, имеется «пакет» исследований по затуханию электромагнитного поля (ЭМП) в зелёных насаждениях (лесу) [27, 28]. Также разработаны методики учёта неоднородностей при расчёте уровня электромагнитного поля в помещении [4, 30, 32-34]. Однако решение

проблем проектирования СМР [2, 6, 13, 29] и моделирования уровня ЭМП [7, 8, 14, 15-17, 24] происходит без рассмотрения особенностей распространения радиоволн над водной поверхностью (ВП).

Водоёмы (озёра, пруды, водохранилища большой протяжённости, реки) достаточно часто расположены непосредственно в пределах населенных пунктов, вблизи них, в рекреационных зонах горожан и пр.

Особую важность имеют эти вопросы для регионов России, включающих дельты рек (в т.ч. и Астраханской области), водохранилища, а также расположенных вблизи морей/океанов. Прибрежная часть суши и водное пространство вдоль берега активно эксплуатируется СМР, пользователями являются не только частные лица, но и комплекс коммерческих и государственных служб [29]. Поэтому при расчетах (проектировании) новых СМР и модификации существующих учет условий затухания радиосигналов (УЗР) достаточно важен для обеспечения устойчивой работы СМР. При этом основными особенностями водных поверхностей являются следующие: значительные изменения «шероховатости» ВП в зависимости от погодных условий (скорости ветра и ее изменчивости); возможность образования льда над поверхностью воды. Ниже мы рассматриваем задачи в основном для гладкой «водной поверхности». Мы относим к этой категории все случаи при волнении менее 0,05 метров по высоте. Отметим, что при частоте излучения 1800 МГц длина электромагнитной волны будет порядка 0,17 м, т.е. более чем в три раза длиннее, чем указанная нами высота неровностей ВП.

Неверный УЗР над ВП может привести к некорректным результатам радиопланирования и размещению новых объектов радиоэлектронных средств (РЭС). В реальной электромагнитной обстановке это может привести к дополнительной паразитной интерференции радиоволн; рассогласованности в построении иерархии сети; ошибочном назначении порядка эстафетной передачи сигнала (хэндовера); образованию зон, так называемых, «островов» и так далее. Как следствие, все это будет приводить к ухудшению параметров качества сети, что будет выражаться в снижении скорости передачи данных; ухудшении качества передачи речи; обрывам телефонных соединений и пр.

Поэтому основной целью данной статьи является разработка адекватных моделей для расчёта уровня сигнала за водными преградами (над ВП) при функционировании РЭС в основных диапазонах СМР.

Общая характеристика существующих подходов к расчетам и их недостатков. Основные используемые диапазоны частот при предоставлении услуг в системах сотовой связи (фиксированной связи, СМР) в соответствии с действующими Европейскими нормативными актами [28-31] закреплены в таких диапазонах: 900 МГц, 1800 МГц, 2100 МГц, 2600 МГц. Несмотря на принадлежность диапазонов 900 и 1800 МГц к системам связи 2-го поколения (GSM – Global System for Mobile Communications) активность использования этого ресурса значительно увеличилась с введением принципа технологической нейтральности [25]. Этот принцип заключается в использовании частотных диапазонов не только той технологией, для которой эти частоты были выделены ранее, но и предоставления возможностей их использования, например, для технологии 4-го поколения LTE (Long-Term Evolution). Таким образом, актуальность исследований в диапазонах частот 900-1800 МГц, которые используются наиболее интенсивно, значительно возрастает.

В рекомендациях Международного союза электросвязи МСЭ-R P.1546-5 [10, 22, 31] раскрыт метод прогнозирования для трасс связи «пункта с зоной» для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 3000 МГц. Однако эти рекомендации не совсем точны для систем СС, так как рассчитаны в основном для мощности передатчика в 1кВт, которая характерна для систем радиовещания. Моделей затухания электромагнитного поля (ЭМП) над ВП для СМР, адекватно отражающих реальную электромагнитную обстановку, в этих рекомендациях не приведено.

Для повышения точности радиопланирования, соблюдения электромагнитной совместимости и максимально гарантированного отсутствия непреднамеренных помех (как внесистемных, так и внутрисистемных) при проектировании систем СС необходимо учитывать различия в затухании сигналов СС над сушей и над ВП, что пока отсутствует в современных методиках расчётов и, как следствие, в современных средствах автоматизированного проектирования (САПР).

На открытых интервалах линий передачи радиосигнала, расчет множителя ослабления для радиолинии имеет интерференционный характер, так как в точку приема кроме прямой волны могут приходиться одна или несколько волн, отраженных от земной поверхности. Интерференционный множитель ослабления V рассчитывается по формуле [12, 26]:

$$V = \sqrt{1 + \Phi^2 + 2 \cdot \Phi \cdot \cos\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot h_1 \cdot h_2}{\lambda \cdot r} + \theta\right)},$$

где Φ – модуль коэффициента отражения, h_1 – высота подъема передающей антенны, м, h_2 – высота подъема приемной антенны, м, r – расстояние между точками приема и передачи, м, θ – фаза коэффициента отражения, град., λ – длина волны в м.

Для расчета интерференционного множителя ослабления необходимо, как правило, определять модуль коэффициента отражения Φ и его фазу θ . Для определения коэффициента отражения и его фазы необходимы такие данные: диэлектрическая проницаемость ϵ подстилающей поверхности; угол сколь-

жения Δ , определяемый графическим путем и зависящий от расстояния между антеннами и от высоты подъема антенн над уровнем ВП.

При распространении радиоволн на большие расстояния значение фазы коэффициента отражения стремится к 180° ($\theta \rightarrow 180^\circ$). Из-за сложности вычисления коэффициентов отражения, при расчетах можно принять их усредненные значения, выбираемые из таблицы «Усредненные значения коэффициентов отражения» [12, 26] (табл. 1).

Таблица 1 – Усредненные значения коэффициентов отражения

№ п/п	Вид поверхности	Φ при длинах волн, см			
		18–15	8–7	5	3–1,5
1	Водная поверхность	0,99–0,95	0,95–0,85	0,85–0,63	0,45–0,2
2	Равнина, пойменные луга, солончаки	0,99–0,95	0,8–0,6	–	–
3	Ровная лесистая местность	0,8–0,6	0,6–0,5	0,5–0,3	0,3–0,1
4	Среднепересеченная лесистая местность	0,5–0,3	0,3–0,2	–	–

Интерференционный множитель ослабления, учитывающий рассеянное распространение радиоволн характерен только для шероховатых поверхностей (суша). Условия направленного отражения радиоволн, создаваемые зеркальными поверхностями (поверхности водоёмов при отсутствии значительного волнения) множитель ослабления учитывать не может.

Достаточно редким случаем является тот факт, когда оператор СС направляет азимуты антенн на противоположную сторону суши через водную преграду. Как правило, зону обслуживания базовых станций ограничивают локально на суше с одной стороны реки или водоёма. При этом обеспечением качества связи водных путей или противоположного берега водоёма операторы СС обычно не занимаются.

Материал и методика проведения исследований. Однако, практически идеальный вариант размещения антенн был использован в прибрежной части реки Волга на территории г. Астрахань оператором СС ЗАО «Астрахань GSM», где и проводились исследования распространения радиоволн СС над ВП.

Для исследований был выбран сайт, где были размещены сразу две базовые станции, работающие в диапазонах 1800 и 900 МГц. Они были установлены на антенно-мачтовом устройстве (ул. Дзержинского, 56/1). Активные азимуты исследуемых направлений излучения антенн составляли 0 (ноль) и 110 градусов для обоих стандартов. Установленные у оператора антенные системы KATHREIN K739623 (GSM 900) и K739495 (DCS 1800) имеют диаграммы направленности в горизонтальной плоскости 65 град. Это позволяет нивелировать некоторую приближенность азимутальной точности размещения измерительного оборудования во время проведения эксперимента.

Макет размещения измерительного оборудования на местности представлен на рисунке 1.

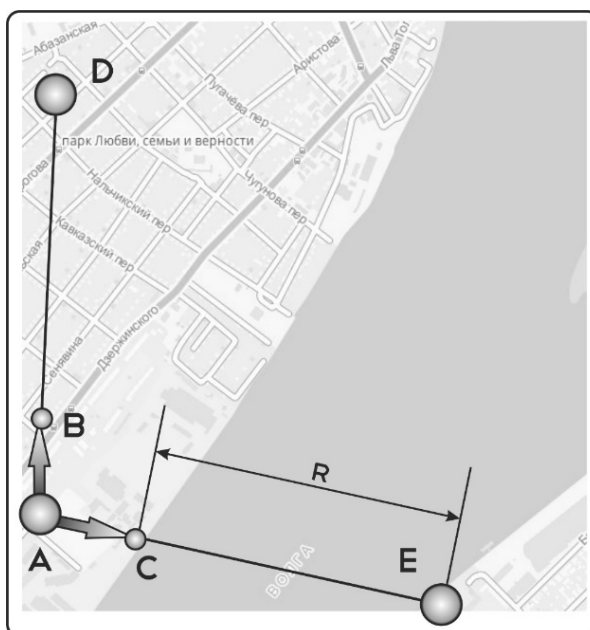


Рисунок 1 – Макет размещения измерительного оборудования при проведении эксперимента

Базовые станции оператора СС размещены в точке А (46 град 20 мин 41сек СШ 47 град 59 мин 43 сек ВД). Измерения проводились в точках В, С, D, и Е. Ввиду идентичности земной поверхности в направлениях точек «В» и «С» (сельская местность с этажностью строений в 1–2 этажа) уровни сигналов

в этих направлениях излучения (0° и 110°), измеряемые в точках «В» и «С» соответственно, были практически одинаковы. Это подтверждает исправность как антенного оборудования, так и передатчиков, работающих в одинаковых режимах на полную мощность. Расстояние от базовой станции до точек «В» и «С» обозначим для удобства внесения в таблицу через «x».

В имеющихся работах автора [26] есть некоторые неточности в полученной модели, сказывающиеся на корректности результатов расчётов. С целью повышения корректности предлагаемой методики и расширения диапазона её практического применения в данной работе использованы данные дополнительных экспериментов. Они были осуществлены в зимний период с тем, чтобы учесть различия в состоянии ВП (частичного оледенения) в зимний период.

Результаты исследований, проведенных в несколько этапов (для того, чтобы охватить воздействие климатических факторов на ВП) представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты экспериментальных исследований УЗР в УВЧ диапазоне над ВП, проведённые в летний и зимний периоды

Длина волны λ , (м)	Математическое ожидание УЗР (dBm) с учётом быстрых замираний			
	Затухание вблизи станции (точки В и С)	Затухание над сушей (точка D) ($R \sim x+800$ м)	Затухание над водной поверхностью летом (точка E) ($R \sim x+800$ м)	Затухание над водной поверхностью зимой (частично покрытие льдом) (точка E) ($R \sim x+800$ м)
~ 0,32	40,3	65,6	45,8	46,3
~ 0,16	56,9	82,3	62,4	63,5

Расстояние мест контрольных измерений (точек D и E) до базовой станции (точка A) было подобрано одинаковым. Оно было выбрано, таким образом, чтобы измерительный комплекс находился в основном створе диаграммы излучения антенн, соответственно азимут 0° для точки D (46 град 21 мин 20 сек СШ 47 град 59 мин 44 сек ВД) и азимут 110° для точки E (46 град 20 мин 36 сек СШ 48 град 00 мин 31 сек ВД). Одновременно, трасса радиолинии «A-D» проходит над сушей, а трасса «A-E» над ВП.

В состав измерительного оборудования входили измерительный комплекс Drive Test Agilent E7475A - интегрированная измерительная система для анализа радиопокрытия в сетях GSM/DCS в комплекте с измерительными телефонами: Sagem OT-75 и OT-290, а также телефоны с установленной программой «NetMonitor» Nokia 6201, Nokia E51, Nokia 3110.

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты проведенных измерений подтвердили, что уровень ЭМП при распространении радиоволн исследуемого диапазона при прохождении над ВП оказался значительно выше уровня поля, трасса прохождения которого находилась над сельской местностью (над сушей). Из этого можно сделать вывод, что затухание над ВП для диапазона 1800 МГц более чем в 4,5 раза меньше, чем над сельской местностью (или пригород) при наличии прямой видимости между антеннами абонентской и базовой станций.

Возможно представление затухания над ВП в виде погонного коэффициента затухания a_m . В этом случае можно использовать полученные при экспериментах результаты расчётов для диапазона 1800 МГц:

$$a_{m_водная_гладь_1800} \approx 0,006875, \text{ дБ/м}$$

Аналогичные данные, согласно проведённым экспериментам, были получены и для диапазона 900 МГц:

$$a_{m_водная_гладь_900} \approx 0,006875, \text{ дБ/м}$$

Для СМР график УЗР, как правило, соответствует логарифмически нормальному (логнормальному) распределению [5, 17]. Поэтому для получения модели затухания сигналов СС над ВП результаты экспериментов были аппроксимированы зависимостью для систем, работающих в диапазоне 900 МГц. Формула, соответствующая методике (модели) расчёта для вышеуказанного диапазона имеет вид:

$$L_{AW_900} = 0.95 \cdot (33.5 + 5 \cdot \lg(f) + 5 \cdot \lg(r)), \tag{1}$$

Для систем, использующих диапазон частот 1800 МГц, формула (модель расчета) имеет вид:

$$L_{AW_1800} = 0.95 \cdot (49.5 + 5 \cdot \lg(f) + 5 \cdot \lg(r)), \tag{2}$$

В этих формулах L_{AW_900} , L_{AW_1800} – потери передачи (затухание) в соответствующих диапазонах над ВП, f – рабочая частота, (ГГц), r – дистанция от передатчика базовой станции до приемника абонентской радиостанции, (м); 0.95 – коэффициент отражения сигнала от ВП (табл. 1).

Для сравнения полученной методики расчёта с методикой расчёта затухания в свободном пространстве используем модель

$$L_{FS} = 32,45 + 20 \cdot \lg(f) + 20 \cdot \lg(r),$$

где L_{FS} – потери передачи в свободном пространстве.

На основе этих формул были построены графические зависимости для кривых потерь передачи для свободного пространства (free space – свободное пространство) и для ВП (рис. 2).

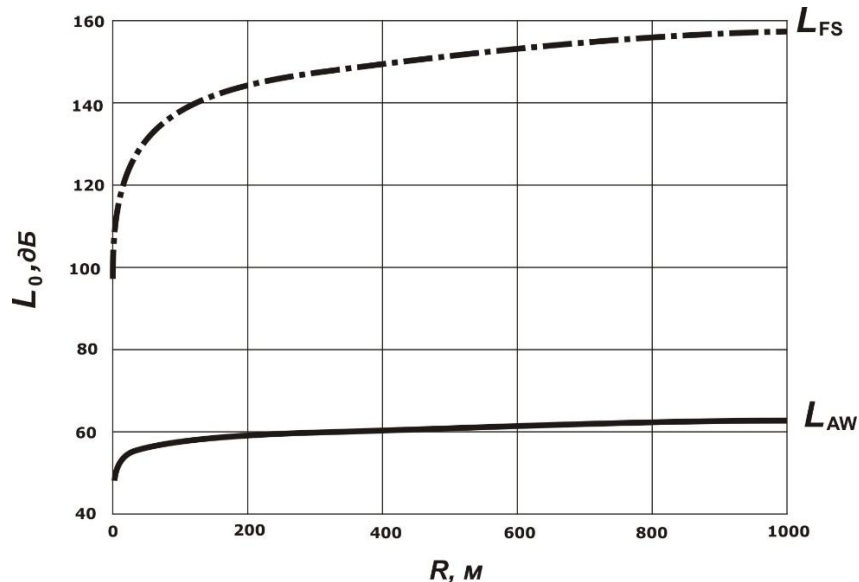


Рисунок 2 – Кривые затухания сигналов сотовой связи над водной поверхностью L_{AW} и в свободном пространстве L_{FS}

На графике (рис.2) наглядно представлено отличие затухания для свободного пространства и для затухания над ВП. Как правило, эта разница в современных математических моделях распространения радиоволн не принимается во внимание. Поэтому и в САПР для создания систем СС указанная разница не учитывается. В свою очередь это может приводить к не оптимальным (не экономичным) решениям при проектировании телекоммуникационных систем, использующих радиосвязь.

Возможности инкорпорирования новых методик в современных системах автоматизированного проектирования. Вопросы оптимизации и регулирования параметров в современных технических системах вообще (и в системах сотовой связи в частности) являются актуальной задачей [2, 9, 24]. В современных российских системах автоматизированного проектирования (САПР) таких как RPLS ONE-GA (Инфо-Тел, Санкт-Петербург), Planet (InfoVista, Москва), и др. [1, 18, 20], используются элементы геоинформационных систем (ГИС) - цифровые карты местности и даже Яндекс-карты. В настоящее время в таких САПР наряду с традиционным статистическим описанием электромагнитных волн в черте города (статистические методы) используются и детерминистские модели, основанные на применении геометрической оптики и геометрической теории дифракции. Такие модели позволяют более адекватно учесть реальную застройку городских районов.

Детерминистские модели, используемые в САПР RPLS ONEGA, например, представляют из себя математическую модель-макет. В ней основные коэффициенты изменчивости параметров сети радиосвязи могут заменяться профессиональным пользователем на основании экспериментальных данных – для повышения точности расчётов в заданных локальных областях местности.

Именно детерминистские модели в профессиональных САПР могут быть переконфигурированы под различные условия, определяемые по экспериментальным данным, полученным специалистами СС в различных регионах.

В последнее время был предложен комплексный подход к расчету поля волны, в котором были совмещены статистические и детерминистские методы. Влияние объектов, далеко отстоящих от абонентских радиостанций, оценивалось статистическим методом, а влияние ближних объектов, создающих зоны радиотени, — детерминистским. Все вышеизложенное позволяет говорить о заметном прогрессе в совершенствовании расчетов (методов моделирования) в отношении механизмов распространения радиоволн.

Предлагаемые автором новые методики, соответствующие формулам (1) и (2) могут использоваться не только «автономно», но и применяться в качестве надстроек к существующим алгоритмам расчётов, заложенным в любые современных САПР для проектирования систем СС.

Выводы. 1. Повышение эффективности проектирования, строительства и эксплуатации систем СС в условиях постоянно усложняющейся электромагнитной обстановки и необходимости периодической реконструкции уже функционирующих современных СМР, становится все более актуальной задачей.

2. В целях повышения точности систем проектирования, автором была разработана расчетная методика оценки затухания сигналов СС в диапазонах 900/1800 МГц над ВП. Модели, используемые в этой методике, которые описываются формулами (1) и (2), позволяют с высокой точностью оценивать затухание радиоволн над ВП.

3. Для проведения упрощенных предварительных расчетов были экспериментально получены погонные коэффициенты затухания сигналов СС над ВП.

4. Использование предлагаемой новой методики расчета позволит проводить более точные расчеты уровня распределения ЭМП для систем СС в населенных пунктах, разделенных водными преградами или имеющими водоёмы; соблюдать внутрисистемную электромагнитную совместимость при назначении частот для базовых станций вблизи водоёмов и каналов. Тем самым будет повышен уровень качества обслуживания абонентов СС.

5. Модели, соответствующие новой методике, потенциально могут быть включены (добавлены) в современные САПР систем СС и систем широкополосного доступа. Это позволит повысить точность расчетов при проведении предварительного проектирования таких систем. Как следствие, принимаемые проектные решения по созданию/развитию СМР (в т.ч. по размещению приемо-передающих станций) могут быть сделаны более рациональными.

Список литературы

1. Архипкин А., Кириленко А., Корнилов А. Система планирования радиосвязи на базе цифровых карт местности // Беспроводные технологии. 2007. № 7. С. 54-57.
2. Бабков В.Ю., Степанец В.А. Сети мобильной связи: планирование, оптимизация, управление. СПбГУТ-ИА Энергомашиностроение, 2007. - 108 с.
3. Брумштейн Ю.М., Гайфитдинова В.Ю. Коммунальные системы городов: анализ целей и возможностей интеллектуализации управления на основе использования информационно-коммуникационных технологий // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии, 2017, №1, с.39-52 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/1\(37\)/39-52.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/1(37)/39-52.pdf)).
4. Bertoni, H.L., Radio Propagation for Modern Wireless Systems, Prentice Hall PTR, New Jersey, 2000.
5. Василенко Г. О. Оценка ослабления сигналов сетей подвижной связи на коротких трассах прямой видимости // Электроника: Наука, Техника, Бизнес. – 2008 - №4 - с. 72-74.
6. Володин Д.В., Соловьев В.В. Оптимальное частотное планирование сетей прямой УКВ радиосвязи с многостанционным доступом и частотным разделением каналов // Радиотехника. 2007. № 7. С. 66-70.
7. Выборнов О.В., Козлов С.В., Спирина Е.А., Петрова Е.А., Ларин Е.В. Прогнозирование уровня сигнала в городе с неравномерной и разновысотной застройкой для сетей сотовой связи стандарта CDMA // Нелинейный мир. 2013. Т. 11. № 3. С. 180-185.
8. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г., Беван Д.Н., Аверин И.М. Определение местоположения мобильного объекта в системе сотовой связи в условиях многолучевого распространения сигналов. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2008. Т. 51. № 2. С. 162-170.
9. Зикратов И.А., Шаго Ф.Н., Гуртов А.В., Иванинская И.И. Оптимизация зоны покрытия сети сотовой связи на основе математического программирования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 2. С. 313-321.
10. ITU-R Recommendations. 2001. P. 1546.
11. Ильин Е.С. Вероятность нарушения связи в сотовой сети мобильной радиосвязи в условиях замирания сигнала и помехи // Инфокоммуникационные технологии. 2009. Т. 7. № 2. С. 27-31.
12. Каменский Н.Н., Модель А.М., Надеенко Б.С. и др. Справочник по радиорелейной связи; – 2-е изд. Перераб. и доп. под редакцией С.В. Бородича. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с
13. Комков Д.В. Характеристики радиопланирования при проектировании беспроводных систем связи // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2013. № 2. С. 3.
14. Колпаков В.М., Синохин В.С., Сорокин А.С. Оценка влияния выбора модели сотового радиопокрытия на характеристики функционирования сети мобильной связи // Телекоммуникации и информационные технологии. 2016. Т. 3. № 1. С. 43-47.
15. Кузнецова Н.М. Модель многолучевого распространения сигнала в задачах частотно-территориального планирования сети сотовой связи // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2007. № 4 (40). С. 58-61.
16. Леммле Д.В. Характеристики передачи сигналов OFDM в многолучевых каналах // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. - Астрахань, 2015, №2-с.207-216 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2\(30\)/207-216.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2(30)/207-216.pdf))
17. Милютин Е.Р., Василенко Г.О., Сиверс М.А., Волков А.Н., Певцов Н.В. Методы расчета поля в системах связи дециметрового диапазона. – СПб: Трида, 2003. – 159 с.
18. Михайлов П.А. Разработка системы частотно-территориального планирования сетей подвижной и фиксированной радиосвязи на базе геоинформационных технологий: // Диссертация кандидата географических наук: 05.12.17. Радиотехнические и телевизионные системы и устройства / Санкт-Петербург, 1999. - 205 с.: ил.

19. Mogensen P.E., Eggers P., Jensen, Andersen J.B. «Urban Area Radio Propagation Measurements at 955 and 1845 MHz for Small and Micro Cells», Proc. of IEEE Global Commun. Conference (GLOBECOM), Phoenix, 1991, pp. 1297-1302.
20. Одоевский С., Степанец В. Планировать беспроводную связь с комфортом. Программный комплекс ONEPLAN RPLS (ONEGA) // Первая миля. 2013. № 2-35. С. 034-039.
21. Одоевский С., Степанец В., Зибарев Е., Болкунов А., Зайченко А. Беспроводная связь и принцип "не навреди": ПК ONEPLAN SAZON // Первая миля. АО "Рекламно-издательский центр "ТЕХНОСФЕРА" 2017. № 4 (65). С. 52-57.
22. Пищин О.Н., Волошин А.А., Буцкая О.Б. Воздействие изменения температуры атмосферы на затухание сигналов сотовой связи Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. Выпуск 2 - Астрахань: Изд-во АГТУ, 2011. – с.132-136
23. Пищин О.Н., Дмитриев В.Н. Повышение эффективности использования радиочастотного ресурса в сетях сотовой подвижной радиосвязи / Научно-технические ведомости СПбГПУ. №2-1(55). Санкт Петербург: Изд-во СПбГПУ. 2008. – С.35-39.
24. Пищин О.Н. Рязанова Е.А. Методика оценки скорости передачи данных в системах четвертого поколения при их реализации на диапазоне систем GSM. «Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире». Материалы XIV Международной научно-практической конференции Изд-во: Информационный издательский учебно-научный центр «Стратегия будущего» (Санкт-Петербург). 16 июня 2016 года С.69-75
25. Пищин О.Н. Анализ и экспериментальные исследования затухания радиосигнала систем сотовой подвижной радиосвязи над водной поверхностью. // Известия южного федерального университета. Технические науки. 2009. №1. С.43-49
26. Popov V. UNF radio wave propagation through woodlands in cellular mobile communication systems. In: 44nd. International Scientific Conference. October 11-13, 2003, Riga Technical University, Transport and Engineering, Railway Transport, Serija 6, Sejums 12, 2004.
27. Popov V., Chaiko A., Homicky V. Mogorit N. Effektivite complex dielectric permittivity of forest media for Radio waves. – Latvian Journal of Physics and Tehnical Sciences, 2001. №2, p. 46-50.
28. Об утверждении Таблицы распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации. Постановление Правительства РФ от 21 декабря 2011 г. N 1049-34.
29. Рахтиенко М.Ю., Клоков В.В. Проектирование морских систем связи с использованием операторов береговой мобильной связи // Эксплуатация морского транспорта. 2012. № 1. С. 30-32.
30. Raparport T.S. Wireless Communications, Principles and Practice, Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J., 1996.
31. Рекомендации МСЭ-R P.1546-5 «Метод прогнозирования для трасс связи «пункта с зоной» для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 3000 МГц. (09/2013)
32. Троицкий В.Н., Шур А.А. «Особенности распространения радиоволн УВЧ и СВЧ диапазонов внутри зданий». Электросвязь, №8, 1998. - С.26-29.
33. Turkmani, A. M. D. and A. F. de Toledo, «Modeling of radio transmission into and within multistory buildings at 900, 1800, and 2300 MHz» IEE Proc.-1, Vol. 40, 462–470, 1993.
34. Yarkoni N. and Blaunstein N., Prediction of Propagation characteristics in Indoor Radio Communication environments. «Progress In Electromagnetic Research, PIER» 59, 151–174, 2006.

References

1. Arhipkin A., Kirilenko A., Kornilov A. Sistema planirovanija radiosvjazi na baze cifrovih kart mestnosti [Sistem of planning of a radio communication on the basis of digital district maps]. Besprovodnye tehnologii [Wireless technologies], 2007, no. 7, pp. 54-57.
2. Babkov V.Ju., Stepanec V.A. Seti mobil'noj svjazi: planirovanie, optimizacija, upravlenie [Networks of mobile communication: planning, optimization, management], SPBGUT-IA [St. Petersburg state university of telecommunications-news agency]. Jenergomashinostroenie [Power plant engineering], 2007, pp. 108.
3. Brumshteyn Ju.M., Gajfitdinova V.Ju. Kommunal'nye sistemy gorodov: analiz celej i vozmozhnostej intellektualizacii upravlenija na osnove ispol'zovanija informacionno-kommunikacionnyh tehnologij [Municipal systems of the cities: the analysis of the purposes and opportunities of intellectualization of management on the basis of use of information and communication technologies]. Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tehnologii [Caspian magazine: management and high technologies], 2017, no. 1, pp.39–52. ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/1\(37\)/39-52.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/1(37)/39-52.pdf))
4. Bertoni, H. L. Radio Propagation for Modern Wireless Systems, Prentice Hall PTR, NewJersey, 2000.
5. Vasilenko G. O. Ocenka oslablenija signalov setej podvizhnoj svjazi na korotkih trassah prjamoj vidimosti [Assessment of weakening of signals of networks of mobile communication on short routes of direct visibility]. Jelektronika: Nauka, Tehnika, Biznes [Electronics: Science, Equipment, Business], 2008, no. 4, pp. 72-74.
6. Volodin D.V., Solov'ev V.V. Optimal'noe chastotnoe planirovanie setej prjamoj UKV radiosvjazi s mnogostacionnym dostupom i chastotnym razdeleniem kanalov [Optimum frequency planning of networks direct VHF of a radio communication with multistation access and frequency division of channels]. Radiotehnika [Radio engineering], 2007, no. 7, pp. 66-70.
7. Vybornov O.V., Kozlov S.V., Spirina E.A., Petrova E.A., Larin E.V. Prognozirovanie urovnja signala v gorode s neravnomernoj i raznovysotnoj zastrojkoj dlja setej sotovoj svjazi standarta CDMA [Prediction of the signal level in the city with non-uniform and raznovysotny building for CDMA standard cellular transmission networks]. Nelinejnij mir [The Non-linear world], 2013, vol. 11, no 3, pp. 180-185.
8. Ermolaev V.T., Flaksman A.G., Bevan D.D.N., Averin I.M. Opredelenie mestopolozhenija mobil'nogo ob#ekta v sisteme sotovoj svjazi v uslovijah mnogoluchevogo rasprostraneniya signalov [Position fix of a mobile object in a cellular

system in the conditions of multipath distribution of signals]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Radiofizika* [News of higher educational institutions. Radio physics], 2008, vol. 51, no. 2, pp. 162-170.

9. Zikratov I.A., Shago F.N., Gurtov A.V., Ivaninskaja I.I. Optimizacija zony pokrytija seti sotovoj svjazi na osnove matematicheskogo programmirovaniya [Optimization of a cover zone of a cellular transmission network on the basis of mathematical programming]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki* [The Scientific and technical messenger of information technologies, mechanics and optics], 2015, vol. 15, no. 2, pp. 313-321.

10. ITU-R Recommendations. 2001. P. 1546.

11. Il'in E.S. Verojatnost' narushenija svjazi v sotovoj seti mobil'noj radiosvjazi v uslovijah zamiraniya signala i pomehi [Probability of disruption of communication on the cellular network of a mobile radio communication in the conditions of fading of a signal and a noise]. *Infokommunikacionnye tehnologii* [Infocommunication technologies], 2009, vol. 7, No. 2, pp. 27-31.

12. Kamenskij N.N., Model' A.M., Nadeenko B.S. i dr. Spravochnik po radiorelejnoj svjazi [The reference manual on radio relay communication], vol. 2, Pererab. i dop. pod redakciej S.V. Borodicha [Reslave. and additional under S.V. Borodich's edition] – M.: Radio i svjaz' [Radio and communication], 1981, pp. 416.

13. Kolpakov V.M., Sinjuhin V.S., Sorokin A.S. Ocenka vlijaniya vybora modeli sotovogo radiopokrytija na harakteristiki funkcionirovaniya seti mobil'noj svjazi [An impact assessment of a choice of model of a cellular radio covering on characteristics of functioning of a network of mobile communication]. *Telekommunikacii i informacionnye tehnologii* [Telecommunication and information technologies], 2016, vol. 3, no. 1, pp. 43-47.

14. Komkov D.V. Harakteristiki radioplanirovaniya pri proektirovanii besprovodnyh sistem svjazi [Characteristics of radio planning at design of wireless communication systems]. *Modelirovanie, optimizacija i informacionnye tehnologii* [Modeling, optimization and information technologies], 2013, no. 2, pp. 3.

15. Kuznecova N.M. Model' mnogoluchevogo rasprostraneniya signala v zadachah chastotno-territorial'nogo planirovaniya sete sotovoj svjazi [Model of multipath distribution of a signal in tasks of frequency and territorial planning a set of cellular communication]. *Vestnik Ul'janovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta* [the Bulletin of the Ulyanovsk state technical university], 2007, no. 4 (40), pp. 58-61.

16. Lemmle D. V. Harakteristiki peredachi signalov OFDM v mnogoluchevyh kanalakh [Characteristics of signaling of OFDM in multibeam channels]. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tehnologii* [Caspian magazine: management and high technology], Astrahan' [Astrakhan], 2015, no. 2. -p.207-216 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2\(30\)/207-216.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2(30)/207-216.pdf))

17. Miljutin E. R., Vasilenko G.O., Sivers M.A., Volkov A.N., Pevcov N.V. Metody raschjota polja v sistemah svjazi decimetrovogo diapazona [Methods of calculation of the field in communication systems of decimeter range], SPb: Triada, 2003, pp. 159.

18. Mihajlov P.A. Razrabotka sistemy chastotno-territorial'nogo planirovaniya setej podvizhnoj i fiksirovannoj radiosvjazi na baze geoinformacionnyh tehnologij: // Dissertacija ... kandidata geograficheskikh nauk: 05.12.17. Radiotehnicheskije i televizionnye sistemy i ustrojstva / Sankt-Peterburg, 1999. - 205 s.: il. 61 00-11/15-2

19. Mogensen P.E., Eggers P., Jensen C., Andersen J.B. Urban Area Radio Propagation Measurements at 955 and 1845 MHz for Small and Micro Cells, Proc. of IEEE Global Commun. Conference (GLOBECOM), Phoenix, 1991, pp. 1297-1302.

20. Odoevskij S., Stepanec V. Planirovat' besprovodnuju svjaz' s komfortom. Programnyj kompleks ONEPLAN RPLS (ONEGA) [To plan a wireless communication with comfort. Program ONEPLAN RPLS complex (ONEGA)]. *Pervaja milja* [First mile], 2013, no. 2-35, pp. 034-039.

21. Odoevskij S., Stepanec V., Zibarev E., Bolkunov A., Zajchenko A. Besprovodnaja svjaz' i princip "ne navredi" PK ONEPLAN SAZON [Wireless communication and the principle don't do much harm": ONEPLAN SAZON personal computer]. *Pervaja milja. AO "Reklamno-izdatel'skij centr "TEHNOSFERA"* [First mile. JSC Advertising and Publishing Center TEHNOSFERA], 2017. No. 4 (65), pp. 52-57.

22. Ob utverzhdenii Tablicy raspredelenija polos radiochastot mezhdru radioslužbami Rossijskoj Federacii. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 21 dekabrya 2011 g. N 1049-34. Rahtienko M.Ju., Klovok V.V. Proektirovanie morskikh sistem svjazi s ispol'zovaniem operatorov beregovoj mobil'noj svjazi [Design of sea communication systems with use of operators of coastal mobile communication]. *Jekspluatacija morskogo transporta* [Operation of the marine transport], 2012, no. 1, pp. 30-32.

23. Pishchin O. N., Voloshin A. A., Buckaja O. B. Vozdejstvie izmeneniya temperatury atmosfery na zatuhanie signalov sotovoj svjazi Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta [Impact of change of temperature of the atmosphere on attenuation of signals of cellular communication the Bulletin of the Astrakhan state technical university]. *Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika* [Management, computer facilities and informatics], 2011, vol. 2, pp.132-136.

24. Pishchin O.N., Dmitriev V.N. Povyshenie jeffektivnosti ispol'zovaniya radiochastotnogo resursa v setjah sotovoj podvizhnoj radiosvjazi [Increase in efficiency of use of a radio-frequency resource on networks of a cellular mobile radio communication]. *Nauchno-tehnicheskije vedomosti SPbGPU* [Scientific and technical lists SPbPU], 2008, no. 2-1(55), pp.35-39.

25. Pishchin O.N. Rjazanova E.A. Metodika ocenki skorosti peredachi dannyh v sistemah chetvjortogo pokolenija pri ih realizacii na diapazone sistem GSM. «Fundamental'nye i prikladnye issledovanija v sovremennom mire» [A technique of assessment of data transmission rate in the systems of fourth generation in case of their implementation on the range of the GSM systems. "Basic and applied researches in the modern world"]. *Materialy XIV Mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii Izd-vo: Informacionnyj izdatel'skij uchebno-nauchnyj centr «Strategija budushhego»* (Sankt-Peterburg) [Materials XIV of the International scientific and practical Publishing house conference: Information publishing educational scientific center "Strategy of the Future" (St. Petersburg)], [], on June 16 2016, pp. 69-75.

26. Pishchin O. N. Analiz i jeksperimental'nye issledovanija zatuhanija radiosignala sistem sotovoj podvizhnoj radiosvjazi nad vodnoj glad'ju [The analysis and the pilot studies of attenuation of a wireless signal of systems of a cellular mobile radio communication over a water smooth surface]. *Izvestija juzhnogo federal'nogo universiteta. Tehnicheskie nauki* [News of Southern Federal University. Technical science], 2009, no. 1, pp.43-49.
27. Popov V. UNF radio wave propagation through woodlands in cellular mobile communication systems. In: 44nd. International Scientific Conference, Riga Technical University, Transport and Engineering, Railway Transport, 2004, October 11-13, vol. 6.
28. Popov V., Chaiko A., Homicky V. Mogorit N. Effektivne complex dielectric permittivity of forest media for Radio waves. *Latvian Journal of Physics and Tehnical Sciences*, 2001, no. 2, pp. 46-50.
29. Rappaport T.S. *Wireless Communications, Principles and Practice*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J., 1996.
30. Rek. MSJe-R P.1546-5 Metod prognozirovanija dlja trass svjazi «punkta s zonoj» dlja nazemnyh sluzhb v diapazone chastot ot 30 MGc do 3000 MGc [A forecasting method for routes of communication of "point with a zone" for terrestrial services in the range of frequencies from 30 MHz to 3000 MHz.], 2013, September.
31. Troickij V. N., Shur A. A. Osobennosti rasprostraneniya radiovoln UVCh i SVCh diapazonov vntri zdanij [Features of distribution of radio waves of UVCh and microwave oven of ranges in buildings]. *Jelektrosvjaz' [Telecommunication]*, no. 8, 1998, pp. 26-29.
32. Turkmani A. M. D., de Toledo A. F. Modeling of radio transmission into and within multistory buildings at 900, 1800, and 2300 MHz, *IEE Proc.-1*, 1993, Vol. 40, 462–470.
33. Yarkoni N., Blaunstein N. Prediction of Propagation characteristics in Indoor Radio Communication environments. «Progress In Electromagnetic Research, PIER», 2006, no. 59, pp. 151–174.

РЕДАКЦИОННЫЙ КОММЕНТАРИЙ К СТАТЬЕ

Расширение использования средств сотовой связи (СС), необходимость повышения надежности использования систем СС делают актуальным решение задач оптимизации их проектирования и эксплуатации. При этом учет отражения радиоволн от относительно гладкой водной поверхности может быть достаточно важен при определении местоположения базовых станций в СС. Однако эти вопросы в существующей литературе практически не рассматриваются. Поэтому работы, направленные на устранение этого недостатка (в т.ч. и публикуемая статья), следует считать полезными. Особенностью публикуемой статьи является ее ярко выраженная прикладная направленность, эмпирический характер полученных зависимостей.

Однако по статье целесообразно сделать следующие замечания.

1) Для обоснования важности (практической значимости) работы представляли бы интерес хотя бы приблизительные оценки для России количеств (или долей) базовых станций и пользователей, для которых существует учет особенностей распространения радиоволн над водными поверхностями.

2) Предложенные в работе модели распространения радиоволн над водной поверхностью основываются на измерениях, проведенных на одном единственном объекте – причем для станций единственного оператора СС. Для повышения «доказательности» результатов целесообразно было бы повторить измерения на разных объектах. Это позволило бы подтвердить, что на результаты (и одели на их основе) не влияют какие-то факторы местного характера.

3) В статье не указано состояние водной поверхности (высота волнения), при которой проводились измерения. Представляется, также, что было бы интересно проведение измерений на том же объекте при разных высотах волн (т.е. в разные даты). Это дало бы возможность включить в модели дополнительный параметр, связанный с учетом высоты волнения. Такой учет, может быть важен для населенных пунктов, расположенных по берегам морей и крупных водохранилищ – особенно если их участки «вдаются» вглубь суши.

4) Целесообразно было бы также как-то отразить (или хотя бы упомянуть) невозможность проведения аналогичных исследований в лабораторных условиях на моделях, а также с использованием вычислительных экспериментов. Это дало бы возможность обосновать, что натурный эксперимент для получения предлагаемых в статье моделей (расчетных соотношений) оказался единственно возможным решением.

5) Целесообразность включения предлагаемых методов расчета в существующие САПР декларирована, однако не совсем ясно, как это технически можно сделать. Обычно все такие САПР являются «закрытыми» для изменений со стороны пользователей, т.е. функциональность САПР может корректироваться только разработчиками – причем иногда в ограниченных пределах.