

УДК 621.396

П.С.Рыженин

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЯ

Воронежский институт высоких технологий

Проведен анализ методов, на основе которых возможно проводить оценку уровня электромагнитного поля внутри помещений. Показано, что на основе детерминированных методов обеспечивается более высокая точность расчетов характеристик рассеяния радиоволн, если сравнивать со статистическими подходами. Происходит построение дерева распространения луча, при этом в корне мы видим луч, который исходит от передающего устройства и каждой точкой отражения или дифракции порождаются дополнительные лучи. При многолучевом распространении сигнала мы наблюдаем несколько наиболее существенных эффектов: фединг, временная дисперсия, угловая модуляция несущей. Приведена модель прямоугольного помещения, которая рассчитывается в рамках лучевого метода.

Ключевые слова: лучевой метод, распространение радиоволн, беспроводная связь, компьютерные сети, антенны.

Среди многих свойств, которые заметным образом показывают отличие компьютерных сетей от функционирующих автономным образом компьютеров, следует отметить наличие обменов информацией между сетевыми узлами, которые связываются между собой на основе линий передач данных [1-4].

При проведении объединения компьютеров в компьютерную сеть появляется возможность заметным образом повысить эффективность использования компьютерных систем в целом. Рост эффективности при этом мы можем получить за счет характеристик обмена информацией, относящейся к компьютерам сети, а также исходя из возможностей использования по каждого из компьютеров сетевых общих ресурсов (мы говорим об информации, внешней памяти, программных приложениях, внешних устройствах) [5-8].

Среди основных признаков в корпоративных сетях следует указать применение глобальных связей, они дают возможности для проведения объединения отдельных сетей, которые относятся к филиалам предприятий и компьютеров для работников, которые трудятся в удаленных режимах при общей локальной сети. В течение последнего времени происходит бурное развитие беспроводных компьютерных сетей, это касается, например беспроводных локальных сетей WLAN (Wireless Local Area Network).

Вследствие бурного развития информационных технологий возникли возможности для появления и быстрого роста глобальной сети Internet. Осуществление развития компьютерной сети трудно рассмотреть без того,

чтобы осуществлять хорошее соблюдение базовых принципов стандартизации, которые относятся к аппаратным и программным обеспечениям [9-10].

Компьютерные сети могут применяться в различных системах обработки сигналов, в том числе и связанных с радиолокационным распознаванием. Объекты, которые мы можем наблюдать на основе радиолокационных систем различного назначения, касаются большого множества типов проблем. Проблемы, направленные на радиолокационное распознавание (классификацию, различение) объектов заключаются в том, что те объекты, которые наблюдают, относят к соответствующим классам и типам. Осуществление процессов распознавания типов объектов может привести к затруднениям, отдельные типы объектов на базе совокупности признаков проводят объединение в классы [11-14].

Применение в статистических способах для того, чтобы определить зону обслуживания для сотовых систем связи, соответствующих эмпирических формул дает возможности для проведения расчётов с высокой скоростью, однако при этом один из недостатков - это большая погрешность при вычислениях (около 10 дБ) вследствие того, что существует множество факторов таких как отражение сигналов от разных объектов (различные строения, земная поверхность и др.), наблюдение дифракции радиоволн, в ней характерным является то, что радиосигнал преломляется на пути распространения, осуществление рассеивания радиосигналов, которое вызывается существованием на местностях большого количества объектов, которые имеют размер меньше, чем длина радиоволны (например, это касается лиственных деревьев) – проводится учет усредненным образом, на базе статистической информации, которую собирают лишь для определённых планировок городов. В тех случаях, когда изменять тип застроек (высоту, тип размещения строений), число лесопарковых зон, и др. то тогда требуется вновь делать сбор всей статистики.

На основе детерминированных методов обеспечивается более высокая точность расчетов характеристик рассеяния радиоволн, если сравнивать со статистическими подходами, и для существующих систем связи, которые оперируют с небольшими пространственными масштабами, они будут довольно эффективными, но при этом дают весьма большие требования по точностям задания моделей сред. Среди таких способов можно отметить большей частью способы геометрической оптики, физической и геометрической теорий дифракции, методы параболических уравнений, и еще численные методы электродинамики.

Анализируя детерминированные способы можно отметить метод трассировки лучей, он довольно с высокой точностью осуществляет

описание явлений распространения радиоволн в пространстве. Указанный способ является универсальным и точным, но в качестве недостатка его применения можно назвать большие объёмы вычислений, поскольку при расчётах указанным способом, вычисления происходят для каждой из точек в пространстве. Вследствие этого во многих САПР его не применяют, а если и он и применяется, то с максимальным упрощением расчетной формулы, где происходит пренебрежение такими параметрами как дифракцией, диффузным рассеянием и происходит учет только нескольких (около 2-х) переотражений.

Исходя из вышесказанного, применение детерминированных способов расчёта распространения радиоволн для условий города дает повышение точности расчётов, но в качестве недостатка отмечают большие объёмы вычислений, что, конечно же, влияет на время расчётов [15-17].

На первом шаге происходит построение дерева распространения луча, при этом в корне мы видим луч, который исходит от передающего устройства и каждой точкой отражения или дифракции порождаются дополнительные лучи, то есть, указанные процессы получаются рекурсивными. Величину глубины рекурсии задают как исходный параметр.

Потом на базе дерева распространения луча, происходит определение всех путей распространения по данному местоположению приёмника. Важно отметить, что нет необходимости вновь рассчитывать дерево, поскольку его построение происходило независимо от того, каково местоположение приёмника. Затем идет преобразование по двумерному распространению луча в трёхмерное, и на основе использования соответствующих формул геометрической теории дифракции мы делаем расчеты лучей при учете отражений и дифракции.

Активное внедрение беспроводных систем связи определило актуальность проблем, связанных с учетом воздействия условий распространения радиоволн на функционирование беспроводных устройств. В существующих условиях построено большое число математических моделей, на основе которых есть возможности вычисления усредненного значения мощностей СВЧ сигналов в городских средах. Но их использовать затруднительно во внутренних областях помещений вследствие того, что проявляются эффекты рассеяния, отражения, поглощения, дифракции и интерференции. В результате, проблема исследования на основе математического моделирования распространения электромагнитных волн внутри помещений при влиянии местных предметов является весьма актуальной.

В подобной модели должны учитываться большое число факторов: дифракция на препятствиях, возникновение потерь при процессах

распространения и отражении от потолка и стен, процессы распределения задержек сигналов, перемещения абонентов, расположение приемных (передающих) антенн, явления несовпадения по поляризации радиоволн. В этой связи, характерным для большинства случаев является многолучевое распространение сигнала, тогда от передатчиков сигналы по нескольким разным путям достигают приемников, в точках приема в итоге могут быть несколько их копий с приблизительно равными амплитудами.

При многолучевом распространении сигнала мы наблюдаем несколько наиболее существенных эффектов:

1. Фединг, связанный с быстрыми изменениями электромагнитных полей в течение небольшого времени или для сравнительно небольшого расстояния;
2. Временная дисперсия, связанная с эффектом эха, иногда возникает, поскольку разное время распространения копий сигналов, которые проходят от передатчиков к приемникам;
3. Для разных копий сигналов появляется случайная угловая модуляция несущей, вследствие того, что появляется доплеровский сдвиг.

Рассмотрим прямоугольное помещение, в котором существуют препятствия на пути распространения электромагнитных волн (Рисунок 1). На указанном рисунке излучатель A_1 является совмещенным с центром декартовой системы координат. В том случае, если использовать уравнение радиолокации и привлечь способ геометрической оптики, то мы имеем возможности для получения выражения, которое дает описание значений мощностей сигналов антенн приемника A_2 [18]:

$$P_2 = \frac{P_1 G_1 G_2 \lambda^2}{(4\pi)^2 r_0^2} \cdot (|F_0 + F_n \cdot \rho_n \cdot e^{-j \cdot \alpha_n} + F_s \cdot \rho_s \cdot e^{-j \cdot \alpha_s} + F_n \cdot \rho_n \cdot e^{-j \cdot \alpha_n} + F_l \cdot \rho_l \cdot e^{-j \cdot \alpha_l}|)^2 \quad (1)$$

где P_1, P_2 – являются значениями уровней мощности для входа A_1 и выхода A_2 ; G_1, G_2 – являются коэффициентами усиления в приемных и передающих антеннах; r_0 – является значением расстояния, которое будет между приемником и передатчиком; λ – является длиной волны; F_0, F_n, F_v, F_p, F_l – являются интерференционными множителями, в которых учитываются направленные свойства передатчиков по направлению на приемники, потолок, пол, левые и правые стены, а также то, что волна падает на грани других объектов; $\alpha_n, \alpha_v, \alpha_p, \alpha_l$ – являются значениями фазовых множителей компонентов электромагнитных полей для однократного отражения от потолка, пола, левой и правой стен, и от граней других объектов; $\rho_n, \rho_v, \rho_p, \rho_l$ – являются модулями комплексных

коэффициентов отражений от поверхностей потолка, пола, левых и правых стен, и от граней других объектов. Когда определяется фазовый множитель α , то требуется определить разность фаз $\beta = \frac{2\pi\delta}{\lambda}$, она связана с разницей длин путей δ по «прямым» и «непрямым» волнам.

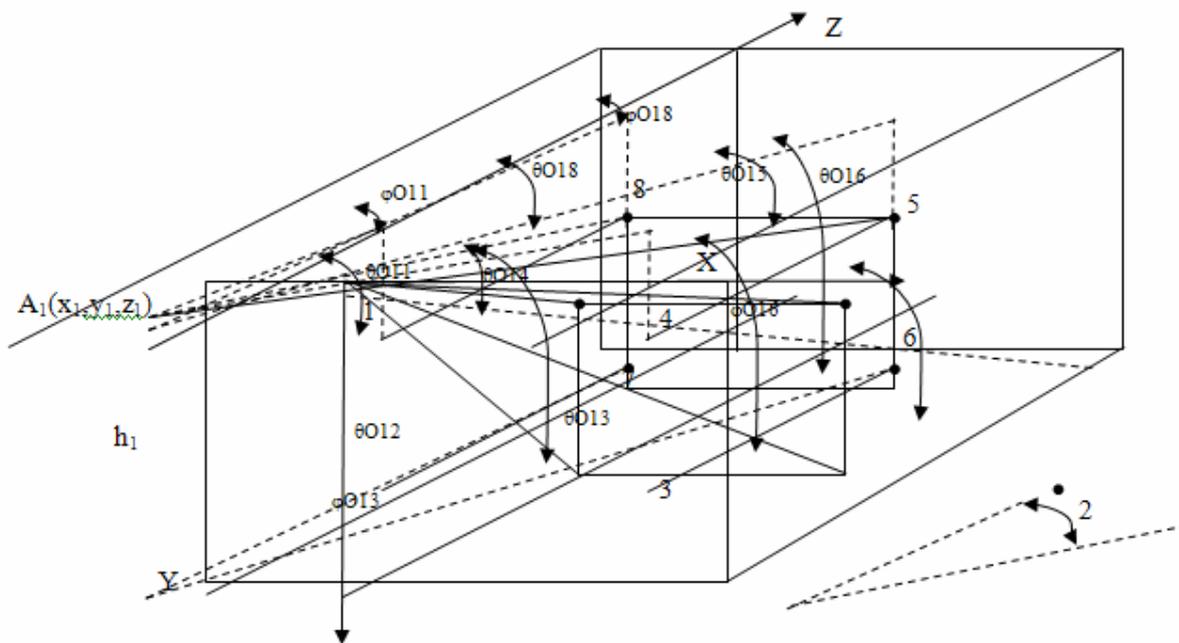


Рисунок 1. Представление предметов в модели

Можно показать, что $\delta = \frac{2h_1h_2}{r_0}$, где h_1, h_2 – являются значениями высот подъемов над уровнем отражающих поверхностей по точкам передач и приема. При этом требуется, чтобы выполнялось условие $r_0 \gg (h_1 + h_2)$. То есть, такое выражение нельзя использовать при расчетах во внутренних областях помещений, где r_0 является сопоставимым с h_1 и h_2 . Чтобы сделать расчет значения δ в рассматриваемой математической модели необходимо применять такое выражение [19]:

$$\delta = \left(1 + \frac{h_2}{h_1}\right) \sqrt{(a \cdot \operatorname{tg}(\varphi) - x_1)^2 + (h_2 + y_2 + y_1)^2 + (a)^2} - \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (2)$$

где $a = \frac{h_1(z_2 - z_1)}{h_1 + h_2}$ – является вспомогательной компонентой; (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) – являются координатами точек передач и приема.

То, как описываются предметы в моделях, базируется на вычислении диапазона углов по направлению из точек излучения на соответствующие грани предметов (Рисунок 1). Если вводить обозначение по всем углам препятствия, как это продемонстрировано на рисунке, то это позволит задавать координаты его вершин. В качестве примера, координаты вершины 1 препятствия O_1 будут (a_1, b_1, c_1) . Из сказанного вытекает, что угол падения электромагнитной волны для главных плоскостей по линиям на такую вершину от излучателя равен [20, 21]:

в горизонтальных плоскостях – $\varphi_1 = \text{arctg}\left(\frac{a_1 - x_1}{c_1 - z_1}\right)$; (3)

в вертикальных плоскостях – $\theta_1 = \text{arcsin}\left(\frac{b_1 - y_1}{\sqrt{(a_1 - x_1)^2 + (b_1 - y_1)^2 + (c_1 - z_1)^2}}\right)$. (4)

Для остального учета предметов необходимо принимать во внимание свойства радиоволны по созданию областей тени, или отражению от поверхностей местных предметов.

Как итог, появляются возможности по учету для общего результирующего «сигнала» приемника, который расположен в границах помещения, компонент, отраженных от соответствующих граней препятствий, они имеют собственные характерные свойства. В качестве таких свойств, в данных случаях, выступают типы материалов и проводящие свойства отражающих поверхностей. Кроме того, еще может быть учет по однократному и двукратному отражению, отдельно выбранных компонент от поверхностей объектов, которые расположены внутри помещений.

В качестве еще одного несомненного плюса такой математической модели можно назвать возможности по учету характеристик направленности излучателей, в зависимости от того, как он расположен в помещении в том числе. Что весьма важно для условий распространения радиоволн внутри помещений, когда есть влияние местных предметов.

Указанные достоинства предлагаемых подходов дают возможности для решения задач по оптимальному размещению в помещении источников электромагнитных волн для критерия максимального уровня мощности сигналов, или найти область пространства помещения при значениях уровней мощности, излучаемых сигналов ниже заданных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lvovich I.Ya. The use of "ant" algorithm for construction of models of objects with maximum average values of scattering characteristics / I.Ya.Lvovich, A.P.Preobrazhensky, O.N.Choporov // В сборнике: Modeling and Information Technologies: Selected Papers of the International Scientific School "Paradigma" (Summer-2015, Varna, Bulgaria) Compiling Editor Dr.Sc., Prof. O.Ja. Kravets. Yelm, WA, USA, 2015. С. 67-72.
2. Щербатых С.С. Разработка алгоритма оптимизации покрытия беспроводных систем связи / С.С.Щербатых, И.Я.Львович, А.П.Преображенский, О.Н.Чопоров // В сборнике: Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций "РТ-2015" Материалы 11-ой международной молодежной научно-технической конференции. Севастоп. гос. ун-т; под ред. А. А. Савочкина. 2015. С. 78.
3. Львович И.Я. Подсистема проектирования защищенных беспроводных сетей / И.Я.Львович, А.П.Преображенский, Е.Ружицкий, О.Н.Чопоров // Информация и безопасность. 2015. Т. 18. № 4. С. 556-559.
4. Preobrazhensky A.P. The principles and approaches of the assessment of the state of wna environment / A.P.Preobrazhensky // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2015. № 15. С. 29-31.
5. Lvovich I.Ya. The analysis of scattering electromagnetic waves with use of paraller computing / I.Ya. Lvovich, A.P.Preobrazhenskiy, O.N.Choporov, K.V.Kaydakova / В сборнике: 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 - Proceedings 2015. С. 7147133.
6. Львович И.Я. Использование "муравьиного" алгоритма при построения моделей объектов, имеющих максимальные средние значения характеристик рассеяния / И.Я.Львович, А.П.Преображенский, О.Н.Чопоров // В сборнике: Международна научна школа "Парадигма". Лято-2015 сборник научни статии в 8 тома. 2015. С. 95-100.
7. Преображенский А.П. Вопросы прогнозирования трехмерных электродинамических характеристик / А.П.Преображенский // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2015. № 15. С. 65-67.
8. Чопоров О.Н. Анализ затухания радиоволн беспроводной связи внутри зданий на основе сравнения теоретических и экспериментальных данных / О.Н.Чопоров, А.П.Преображенский, А.А.Хромых // Информация и безопасность. 2013. Т. 16. № 4. С. 584-587.

9. Ерасов С.В. Оптимизационные процессы в электродинамических задачах / С.В.Ерасов // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2013. № 10. С. 20-26.
10. Кульнева Е.Ю. О характеристиках, влияющих на моделирование радиотехнических устройств / Е.Ю.Кульнева, И.А.Гащенко // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5-2. С. 50.
11. Головинов С.О. Проблемы управления системами мобильной связи / С.О.Головинов, А.А.Хромых // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 13-14.
12. Ермолова В.В. Архитектура системы обмена сообщений в немаршрутизируемой сети / В.В.Ермолова, Ю.П.Преображенский // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2010. № 7. С. 79-81.
13. Мишин Я.А. О системах автоматизированного проектирования в беспроводных сетях / Я.А.Мишин // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2013. № 10. С. 153-156.
14. Милошенко О.В. Методы оценки характеристик распространения радиоволн в системах подвижной радиосвязи / О.В.Милошенко // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 60-62.
15. Баранов А.В. Проблемы функционирования mesh-сетей / А.В. Баранов // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 49-50.
16. Львович И.Я. Применение методологического анализа в исследовании безопасности / И.Я.Львович, А.А.Воронов // Информация и безопасность. 2011. Т. 14. № 3. С. 469-470.
17. Болучевская О.А. Свойства методов оценки характеристик рассеяния электромагнитных волн / О.А.Болучевская, О.Н.Горбенко // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2013. № 3. С. 4.
18. Гавриленко В.Б. Распространение радиоволн в современных системах мобильной связи/ В.Б. Гавриленко, В.А. Яшнов. - Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет, 2003. - 148 с.
19. Печаткин А.В. Системы мобильной связи. Часть 1. Принципы организации, функционирования и частотного планирования систем мобильной связи: Учебное пособие/ А.В. Печаткин. - Рыбинск: РГАТА, 2008. - 122 с.
20. Кочегаров И.И. Информационные технологии проектирования. Методология разработки и проектирования РЭС: учебн. пособие/ В.Б. Алмаметов, И.И. Кочегаров. - Пенза: Изд. ПГУ, 2013 - 76с.

21. Андреев, П.Г. Моделирование распространения электромагнитных волн в помещении прямоугольной формы с учетом влияния местных предметов/ П.Г. Андреев, А.Н. Якимов, В.В. Князева // Сборник докладов 2-й Всероссийской Микроволновой конференции (Москва, 26-28 ноября 2014 г.). - М.: Изд-во JRE-ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2014. - С. 244-248.

P. S. Ryzhenin

THE SIMULATION OF RADIO WAVE PROPAGATION INDOORS

Voronezh Institute of High Technologies

The analysis of such methods, based on which we can assess the level of electromagnetic fields inside premises. It is shown that on the basis of the deterministic methods achieve a higher accuracy of calculations of scattering characteristics of radio waves, when compared with statistical approaches. Occurs building the tree of beam propagation, while fundamentally we see the beam coming from the transmitting device and each point of reflection or diffraction are generated by the additional rays. When multipath propagation of the signal we are seeing some of the most significant effects: fading, time dispersion, the angular modulated carrier. The model rectangular space, which is calculated in the framework of the ray method.

Keywords: ray method, wave propagation, wireless communication, computer networks, antenna.

REFERENCES

1. Lvovich I.Ya. The use of "ant" algorithm for construction of models of objects with maximum average values of scattering characteristics / I.Ya.Lvovich, A.P.Preobrazhensky, O.N.Choporov // V sbornike: Modeling and Information Technologies: Selected Papers of the International Scientific School "Paradigma" (Summer-2015, Varna, Bulgaria) Compiling Editor Dr.Sc., Prof. O.Ja. Kravets. Yelm, WA, USA, 2015. S. 67-72.
2. Shcherbatykh S.S. Razrabotka algoritma optimizatsii pokrytiya besprovodnykh sistem svyazi / S.S.Shcherbatykh, I.Ya.L'vovich, A.P.Preobrazhenskiy, O.N.Choporov // V sbornike: Sovremennye problemy radiotekhniki i telekommunikatsiy "RT-2015" Materialy 11-oy mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Sevastop. gos. un-t; pod red. A. A. Savochkina. 2015. S. 78.
3. L'vovich I.Ya. Podсистема proektirovaniya zashchishchennykh besprovodnykh setey / I.Ya.L'vovich, A.P.Preobrazhenskiy, E.Ruzhitskiy, O.N.Choporov // Informatsiya i bezopasnost'. 2015. T. 18. № 4. S. 556-559.

4. Preobrazhensky A.P. The principles and approaches of the assessment of the state of wireless environment / A.P.Preobrazhensky // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2015. № 15. S. 29-31.
5. Lvovich I.Ya. The analysis of scattering electromagnetic waves with use of parallel computing / I.Ya. Lvovich, A.P.Preobrazhenskiy, O.N.Choporov, K.V.Kaydakova / V sbornike: 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 - Proceedings 2015. S. 7147133.
6. L'vovich I.Ya. Ispol'zovanie "murav'inogo" algoritma pri postroeniya modeley ob'ektov, imeyushchikh maksimal'nye srednie znacheniya kharakteristik rasseyaniya / I.Ya.L'vovich, A.P.Preobrazhenskiy, O.N.Choporov // V sbornike: Mezhdunarodna nauchna shkola "Paradigma". Lyato-2015 sbornik nauchni statii v 8 toma. 2015. S. 95-100.
7. Preobrazhenskiy A.P. Voprosy prognozirovaniya trekhmernykh elektrodinamicheskikh kharakteristik / A.P.Preobrazhenskiy // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2015. № 15. S. 65-67.
8. Choporov O.N. Analiz zatukhaniya radiovoln besprovodnoy svyazi vnutri zdaniy na osnove sravneniya teoreticheskikh i eksperimental'nykh dannykh / O.N.Choporov, A.P.Preobrazhenskiy, A.A.Khromykh // Informatsiya i bezopasnost'. 2013. T. 16. № 4. S. 584-587.
9. Erasov S.V. Optimizatsionnye protsessy v elektrodinamicheskikh zadachakh / S.V.Erasov // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2013. № 10. S. 20-26.
10. Kul'neva E.Yu. O kharakteristikakh, vliyayushchikh na modelirovanie radiotekhnicheskikh ustroystv / E.Yu.Kul'neva, I.A.Gashchenko // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2014. № 5-2. S. 50.
11. Golovinov S.O. Problemy upravleniya sistemami mobil'noy svyazi / S.O.Golovinov, A.A.Khromykh // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2012. № 9. S. 13-14.
12. Ermolova V.V. Arkhitektura sistemy obmena soobshcheniy v nemarshrutiziruемой seti / V.V.Ermolova, Yu.P.Preobrazhenskiy // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2010. № 7. S. 79-81.
13. Mishin Ya.A. O sistemakh avtomatizirovannogo proektirovaniya v besprovodnykh setyakh / Ya.A.Mishin // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2013. № 10. S. 153-156.
14. Miloshenko O.V. Metody otsenki kharakteristik rasprostraneniya radiovoln v sistemakh podvizhnoy radiosvyazi / O.V.Miloshenko // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2012. № 9. S. 60-62.
15. Baranov A.V. Problemy funktsionirovaniya mesh-setey / A.V. Baranov // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2012. № 9. S. 49-50.

- 16.L'vovich I.Ya. Primenenie metodologicheskogo analiza v issledovanii bezopasnosti / I.Ya.L'vovich, A.A.Voronov // Informatsiya i bezopasnost'. 2011. T. 14. № 3. S. 469-470.
- 17.Boluchevskaya O.A. Svoystva metodov otsenki kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnykh voln / O.A.Boluchevskaya, O.N.Gorbenko // Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii. 2013. № 3. S. 4.
- 18.Gavrilenko V.B. Rasprostranenie radiovoln v sovremennykh sistemakh mobil'noy svyazi/ V.B. Gavrilenko, V.A. Yashnov. - Nizhniy Novgorod: Nizhegorodskiy gosudarstvennyy universitet, 2003. - 148 s.
- 19.Pechatkin A.V. Sistemy mobil'noy svyazi. Chast' 1. Printsipy organizatsii, funktsionirovaniya i chastotnogo planirovaniya sistem mobil'noy svyazi: Uchebnoe posobie/ A.V. Pechatkin. - Rybinsk: RGATA, 2008. - 122 s.
- 20.Kochegarov I.I. Informatsionnye tekhnologii proektirovaniya. Metodologiya razrabotki i proektirovaniya RES: uchebn. posobie/ V.B. Almametov, I.I. Kochegarov. - Penza: Izd. PGU, 2013 - 76s.
- 21.Andreev, P.G. Modelirovanie rasprostraneniya elektromagnitnykh voln v pomeshchenii pryamougol'noy formy s uchetom vliyaniya mestnykh predmetov/ P.G. Andreev, A.N. Yakimov, V.V. Knyazeva // Sbornik dokladov 2-y Vserossiyskoy Mikrovolnovoy konferentsii (Moskva, 26-28 noyabrya 2014 g.). - M.: Izd-vo JRE-IRE im. V.A. Kotel'nikova RAN, 2014. - S. 244-248.