

УДК 621.396

Ю. Штефанович, Ю. С. Сахаров

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ АНТЕННЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ АППАРАТА ОБОБЩЕННЫХ МАТРИЦ РАССЕЯНИЯ

Панъевропейский университет, Братислава, Словакия

Государственный университет Дубна, Москва, Россия

В настоящее время происходит активное развитие средств радиосвязи, используется все большее число излучающих и приемных устройств. Между находящимися рядом объектами в помещениях (антеннами, металлодиэлектрическими структурами) возникает электродинамическое взаимодействие, влияющее на их работу. Данная статья направлена на разработку методики оценки характеристик такого взаимодействия. Ведущим подходом к исследованию данной проблемы является использование метода, основанного на обобщенных матрицах рассеяния. Знание обобщенных матриц рассеяния предоставляет возможности для проведения расчетов характеристик антенных систем, не рассматривая геометрию элементов. По аналогии с использованием матриц четырехполюсников и многополюсников, используемых в электрических цепях, в обобщенных матрицах рассеяния осуществляется минимизация расчетов при проведении анализа комплексных антенных систем. В статье представлены результаты моделирования взаимодействия рамочной антенны и шара, который сформирован из диэлектрического материала. Характеристики рассеяния рассчитывались на основе метода интегральных уравнений. На основе расчетов взаимодействия между электродинамическими объектами можно оценить влияние положения антенн на уровень измеряемых электромагнитных полей. Материалы статьи представляют практическую ценность для специалистов, связанных с проектированием беспроводных сетей внутри помещений.

Ключевые слова: радиосвязь, моделирование, рассеяние радиоволн, матрица рассеяния, антенна.

Введение. Для разных технических приложений важно использовать методики, связанные с расчетом взаимодействия компонентов антенных систем и антенн, в которых есть близко расположенные элементы [1-3].

Построение методик решения таких задач является актуальным вследствие того, что широко распространены средства связи в технике, бытовых условиях и идет разработка беспроводных компьютерных сетей. Это непосредственно касается следующих областей:

1. Взаимодействие антенн сотовых телефонов и людей.
2. Взаимодействие между элементами антенных систем.
3. Проектирование беспроводных компьютерных сетей. Необходимо оценивать взаимодействие между антеннами, расположенными на компьютерах, с компьютерами, имеющими близкорасположенный монитор и другими объектами. В этой связи также могут рассматриваться антенны мышей, клавиатур и т. д.
4. Антенны, которые располагаются на разных объектах, например, на автомобилях и др.

Основываясь на проведенном авторами анализе, можно утверждать, что актуальной может считаться задача, связанная с анализом антенных систем, а также с учетом взаимодействий антенн и рассеивающих объектов, ими могут быть, например, самолеты, здания, люди и т. д. Процессы, связанные с излучением и приемом радиоволн антенными устройствами, можно отнести к комплексным волновым процессам [4-6].

Анализ существующих подходов. Дать полное математическое описание подобных процессов можно на основе общей теории электромагнитного поля, которая базируется на том, что решается система уравнений Максвелла, она дополняется материальными уравнениями по средам и граничным условиям. Несмотря на то, что существует внешняя относительная простота и физическая четкость в уравнениях Максвелла, их прямое применение в процессах проектирования разных антенн не ведет к ожидаемым результатам вследствие заметных математических сложностей [7-9].

Использование строгих и полных решений электродинамических задач даже в случаях, когда анализируются простейшие антенны (например, в уединенных вибраторах или щелевых излучателях), дают слишком сложные векторные функции напряженностей по электрическим и магнитным полям, которые зависят от трех пространственных координат [10-12].

В этой связи являются более распространенными численные методы, связанные с анализом антенных систем на базе разных универсальных программ. Некоторые из численных методов используют дискретное представление уравнений Максвелла, а некоторые – интегральные уравнения.

И для первого, и для второго случая идет выполнение большого объема вычислений, особенно, когда идет поиск оптимальных положений антенн.

Когда меняется положение антенны, например, на самолетах или автомобилях, необходимо все расчеты исполнять вновь. Проведение выбора оптимального взаимного размещения компонентов антенных решеток тоже определяет большой объем вычислений при осуществлении расчетов.

Для того, чтобы уменьшать время анализа и сокращать вычислительные затраты, предлагается применять подход, базирующийся на обобщенных матрицах рассеяния антенных структур и рассеивающих тел.

Знание того, какие возможности дают обобщенные матрицы рассеяния для расчетов характеристик антенных систем, не обращаясь к геометрии элементов. Указанный подход является аналогичным применению матриц четырехполосников и многополосников, которые анализируют в электрических цепях. На основе теории

четырёхполюсников можно проводить расчет характеристик сложных соединений, не обращаясь к схеме цепей. Аналогичным образом в обобщенных матрицах рассеяния идет минимизация расчетов при проведении анализа комплексных антенных систем.

Запись обобщенной матрицы рассеяния зависит от выбора вида волн, которые используются для описания электромагнитного поля в свободном пространстве.

Для плоских электромагнитных волн характерна наиболее простая структура полей. Но их применение для того, чтобы рассчитывать обобщенные матрицы рассеяния в различных реальных антеннах, имеющих конечные размеры, мы можем считать малоэффективным. Есть связь амплитуд гармоник плоских волн, электромагнитных полей и пространственных координат относительно некоторых плоскостей на основе двухмерного преобразования Фурье.

Если мы будем считать, что для того, чтобы описать поле, применяется порядка нескольких десятков пространственных гармоник относительно любой из двух координат, то мы будем приходить к тому, что в обобщенной матрице рассеяния будет порядок $10^4 \times 10^4$.

Проведение вычислений с матрицами подобных больших размеров довольно затруднительно.

Мы основываемся на том, что антенны или рассеиватели можно окружать сферой. Поля на такой сфере представляются как сумма полей сферических гармоник. Поскольку сферическая поверхность является ограниченной в пространстве, а плоскость не является ограниченной, то сферические гармоники дают возможности для представления полей вблизи рассеивателей относительно небольшим количеством слагаемых.

Сферические гармоники характеризуются конечной энергией, это дает возможности при расчете полей всегда сделать ограничение по конечному числу слагаемых в разложении полей. Для энергии плоских волн необходимо в разложении использовать большее число слагаемых.

Проведение переходов к конечным суммам и осуществление решения практических задач по тому, как взаимодействуют рассеиватели с применением плоских волн, можно рассматривать как громоздкую и сложную вычислительную задачу.

Рассматриваемый нами способ анализа комбинированных СВЧ-систем, можно считать в виде варианта метода частичных областей (МЧО). Частичными областями можно считать пространственные области, заключенные среди двух сфер, которые характеризуются общим центром. В качестве исключения можно рассматривать внутреннюю область – шар, имеющий наименьший радиус, и внешнюю область – внешнюю часть пространства относительно к сфере, имеющей наибольший радиус. Поля на поверхности сфер, которые разделяют каждые частичные области, можно представить в виде суммы полей сферических гармоник.

Для того, чтобы определить сферические гармоники, необходимо решать уравнения Максвелла в рамках метода разделения переменных с привлечением сферических систем координат. Удобно применять сферические гармоники, когда проводится аналитическое решение задач, связанных с рассеянием плоских волн на сферах. Их также применяют в определении полей излучения антенных устройств в дальних зонах на основе результатов измерений их ближних полей.

Сферические гармоники применяют, когда анализируется взаимодействие источников радиоволн или акустических волн и помещений, в которых располагаются источники. Их использование позволяет сделать метод частичных областей более удобным при численном анализе, поскольку поля описывают на основе дискретного спектра.

Можно говорить о важном преимуществе сферических гармоник по сравнению со случаем плоских волн. При использовании плоских волн спектр будет непрерывен, поскольку параметр, который характеризует волну – волновой вектор – будет рассматриваться в качестве непрерывного параметра.

Следует отметить, что появляющаяся при этом необходимость в вычислениях специальных функций (говорят о сферических функциях Бесселя и присоединенных функциях Лежандра) не будет являться проблемой для современных средств вычислительной техники.

В результате, метод анализа антенных устройств на базе обобщенных матриц рассеяния можно рассматривать в виде обобщения классических матричных методов анализа СВЧ-многополюсников. Его характерное отличие заключается в том, что есть физическая естественность, простота математической формализации, строгая теоретическая обоснованность.

Метод активно применяют сейчас на практике при проведении расчетов СВЧ-многополюсников. А его распространение на антенные устройства определяет разработку простых алгоритмов, удобных в численном анализе антенных систем.

Методика. Мы рассматриваем задачу, в которой антенна или рассеиватель будут размещены между двумя сферами (Рисунок1). Запись волн свободного пространства основывается на сферических гармониках относительно внешних и внутренних сфер.

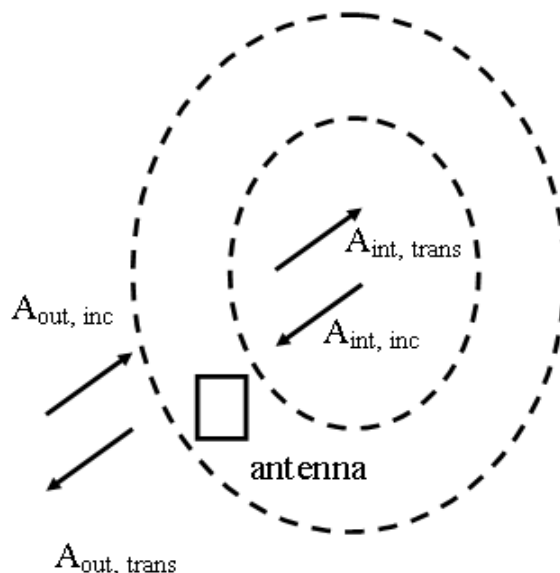


Рисунок 1 – Схема распространения волн по отношению к антенне, размещенной между двумя сферами (индексами int и out обозначены внутренняя и внешняя область, индексами inc и trans обозначены падающая и прошедшая волна)

В результате обобщенную матрицу рассеяния мы можем представить в виде совокупности девяти подматриц:

$$S = \begin{bmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} & S_{1,3} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & S_{2,3} \\ S_{3,1} & S_{3,2} & S_{3,3} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

За счет подматриц $S_{1,1}$, $S_{2,1}$, $S_{3,1}$ идет определение преобразований исходных волн (Рисунок 1) в отраженные волны в фидерах, в волны, соответствующие свободному пространству относительно внутренней сферы и в волны, которые соответствуют свободному пространству относительно внешней сферы соответствующим образом.

За счет подматриц $S_{2,1}$, $S_{2,2}$, $S_{2,3}$ идет определение преобразований, падающих на внутреннюю сферу волн, относящихся к свободному пространству в волны фидеров, в волны, относящиеся к свободному пространству на внутренней сфере и в волны, относящиеся к свободному пространству на внешней сфере, соответствующим образом (Рисунок 1).

За счет подматриц $S_{3,1}$, $S_{3,2}$, $S_{3,3}$ идет определение преобразований, падающих на внешнюю сферу волн, относящихся к свободному пространству в волны фидеров, в волны, относящиеся к свободному пространству на внутренней сфере, и в волны, относящиеся к свободному пространству на внешней сфере соответственно (Рисунок 1).

В качестве примера мы рассмотрим решение задачи, связанной с взаимодействием рамочной антенны и шара, сформированного из диэлектрического материала (Рисунок 3).

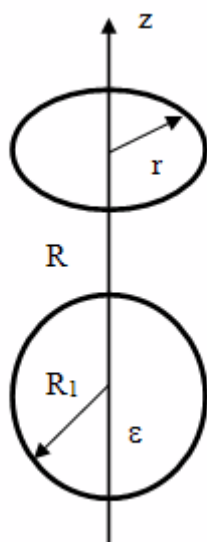


Рисунок 2 – Схема расположения рамочной антенны над диэлектрическим шаром

Был сформирован алгоритм на основе метода интегральных уравнений и создана программа, позволяющая осуществить расчет взаимодействий рамки и шара, который в своем составе имеет диэлектрический материал на базе обобщенных матриц рассеяния.

Результаты. На основе рассмотренного подхода были получены зависимости основных характеристик: входного сопротивления (Рисунок 3) и диаграммы направленности (Рисунок 4) от того, какое отношение расстояния R от рамки до шара к величине длины волны λ .

Проведены расчеты для радиуса шара 2.17λ , а также для 0.88λ . Шар был рассмотрен в виде рассеивателя.

Элементы в обобщенной матрице рассеяния шара были рассчитаны на основе того, что использовалось граничное условие равенства тангенциальных составляющих в электромагнитных полях на поверхности шара, который состоит из диэлектрического материала.

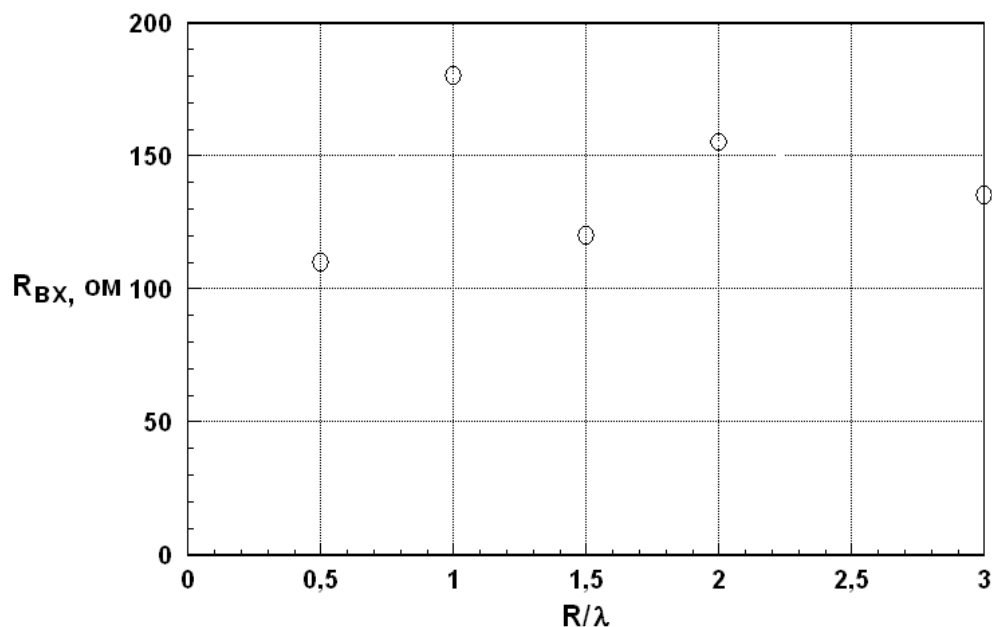


Рисунок 3 – Зависимость входного сопротивления от R

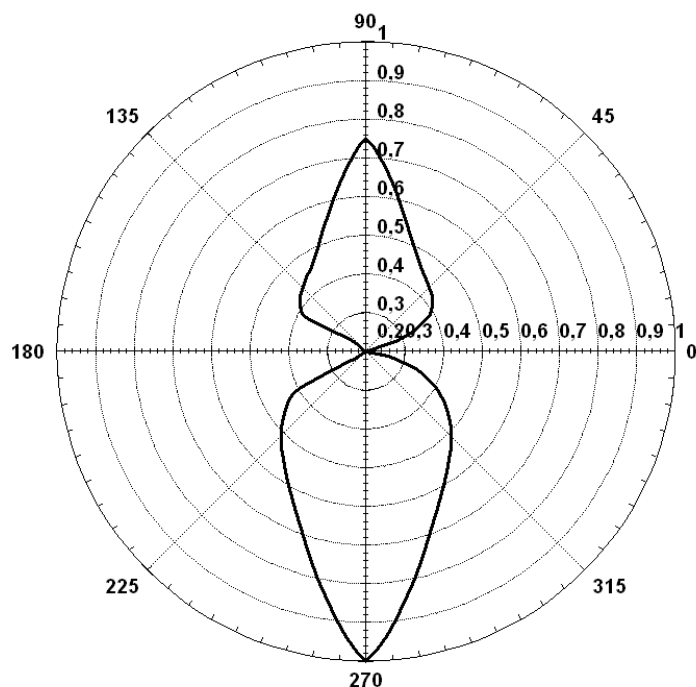


Рисунок 4 – Зависимость диаграммы направленности в вертикальной плоскости от R

На основе расчетов зависимостей взаимодействия рамочной антенны и диэлектрического шара на базе обобщенных матриц рассеяния возникают возможности для формирования выводов о влиянии положения антенн, о том, как изменяются ее характеристики во время варьирования диэлектрической проницаемости шаров. На основе приведенной модели

можно проводить расчет полей в системе «голова человека – антенна мобильного телефона».

Вывод. Разработан подход, связанный с анализом антенных систем и рассеивателей на базе обобщенных матриц рассеяния, предоставляющий возможности для эффективного анализа антенн и составных антенных систем. Решена задача, в которой анализируется взаимодействие рамочной антенны и шара, сформированного из диэлектрического материала. Разработан алгоритм и сформирована программа, позволяющие проводить учет электродинамического взаимодействия между объектами на базе обобщенных матриц рассеяния. В результате, могут быть получены зависимости по основным характеристикам: диаграммам направленности и входному сопротивлению от того, какое расстояние от рамки до шара. Когда диэлектрик будет входить в рамку, можно наблюдать сильное изменение относительно реактивной составляющей во входном сопротивлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Львович Я. Е. Разработка системы автоматизированного проектирования беспроводных систем связи / Я. Е. Львович, И. Я. Львович, А. П. Преображенский, С. О. Головинов // Телекоммуникации. – 2010. – № 11. – С. 2-6.
2. Львович Я. Е. Исследование методов оптимизации при проектировании систем радиосвязи / Я. Е. Львович, И. Я. Львович, А. П. Преображенский, С. О. Головинов // Теория и техника радиосвязи. – 2011. – № 1. – С. 5-9.
3. Толстых С. М. Analytical review of methods of information security in wireless networks / С. М. Толстых, А. Г. Юрочкин // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2017. – № 1 (20). – С. 67-69.
4. 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.
5. Львович Я. Е. Исследование метода трассировки лучей для проектирования беспроводных систем связи / Я. Е. Львович, И. Я. Львович, А. П. Преображенский, С. О. Головинов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2012. – Т. 17. – № 1. – С. 32-35.
6. Преображенский А. П. САПР современных радиоэлектронных устройств и систем / А. П. Преображенский, Р. П. Юров // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2006. – Т. 2. – № 3. – С. 35-37.

7. Алимбеков А. Р. Методы определения рассеивающих свойств объектов / А. Р. Алимбеков, Е. А. Авдеенко, В. В. Шевелев // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2017. – № 1 (20). – С. 22-24.
8. Толстых С. М. Управление системами беспроводной связи / С. М. Толстых, А. Г. Юрочкин // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2017. – № 2 (21). – С. 83-85.
9. Шапаев А. В. Оптимизация беспроводных сенсорных сетей / А. В. Шапаев, А. Г. Юрочкин // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2017. – № 2 (21). – С. 86-89.
10. Баутин И. А. Модели распространения радиосигнала WI-FI / И. А. Баутин, А. Г. Юрочкин // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2017. – № 2 (21). – С. 107-109.
11. Воронов А. А. Обеспечение системы управления рисками при возникновении угроз информационной безопасности / А. А. Воронов, И. Я. Львович, Ю. П. Преображенский, В. А. Воронов // Информация и безопасность. – 2006. – Т. 9. – № 2. – С. 8-11.
12. Львович Я. Е. Исследование метода трассировки лучей при проектировании беспроводных систем связи / Я. Е. Львович, И. Я. Львович, А. П. Преображенский, С. О. Головинов // Информационные технологии. – 2011. – № 8. – С. 40-42.

Y. Shtefanovich, Y. S. Sakharov

THE MODELING OF COMPLEX ANTENNA DEVICES ON THE BASIS OF THE APPARATUS OF THE GENERALIZED SCATTERING MATRIX

*Pan-European University, Bratislava, Slovakia
State University «Dubna», Moscow, Russia*

Currently, the active development of the telecommunication facilities, used by an increasing number of transmitting and receiving devices can be observed. Between nearby objects in space (antennas, metal-dielectric structures) occurs electrodynamic interactions that affect their work. This paper aims to develop methods for the assessment of the characteristics of this interaction. A leading approach to the study of this problem is the use of a method based on generalized scattering matrix. Knowledge of the generalized scattering matrix provides the possibility for calculations of the characteristics of the antenna system, without considering the geometry. By analogy with the use of matrices of two- and multiprobe used in electrical circuits, generalized scattering matrix is carried out to minimize the calculations for the analysis of complex antenna systems. The paper presents the results of modeling of the interaction loop antenna ball, which is formed of a dielectric material. The dispersion characteristics were calculated based on the method of integral equations. On the

basis of calculations of the electrodynamic interaction between objects is possible to estimate the influence of the position of the antennas on the level of measured electromagnetic fields. The materials of the article are of practical value to professionals associated with the design of wireless networks indoors.

Keywords: telecommunication, simulation, scattering of radio waves, scattering matrix, antenna.

REFERENCES

1. L'vovich Ya. E. Razrabotka sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya besprovodnykh sistem svyazi / Ya. E. L'vovich, I. Ya. L'vovich, A. P. Preobrazhenskiy, S. O. Golovinov // *Telekommunikatsii*. 2010. No. 11. pp. 2-6.
2. L'vovich Ya. E. Issledovanie metodov optimizatsii pri proektirovanii sistem radiosvyazi / Ya. E. L'vovich, I. Ya. L'vovich, A. P. Preobrazhenskiy, S. O. Golovinov // *Teoriya i tekhnika radiosvyazi*. 2011. No. 1. pp. 5-9.
3. Tolstykh S. M. Analytical review of methods of information security in wireless networks / S. M. Tolstykh, A. G. Yurochkin // *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy*. 2017. No. 1(20). pp. 67-69.
4. 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. Vol.16. No. 4. pp. 584-587.
5. L'vovich Ya. E. Issledovanie metoda trassirovki luchey dlya proektirovaniya besprovodnykh sistem svyazi / Ya. E. L'vovich, I. Ya. L'vovich, A. P. Preobrazhenskiy, S. O. Golovinov // *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*. 2012. Vol. 17. No. 1. pp. 32-35.
6. Preobrazhenskiy A. P. SAPR sovremennykh radioelektronnykh ustroystv i sistem / A. P. Preobrazhenskiy, R. P. Yurov // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2006. Vol. 2. No. 3. pp. 35-37.
7. Alimbekov A. R. Metody opredeleniya rasseivayushchikh svoystv ob"ektov / A. R. Alimbekov, E. A. Avdeenko, V. V. Shevelev // *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy*. 2017. No. 1 (20). pp. 22-24.
8. Tolstykh S. M. Upravlenie sistemami besprovodnoy svyazi / S. M. Tolstykh, A. G. Yurochkin // *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy*. 2017. No. 2 (21). pp. 83-85.
9. Shapaev A. V. Optimizatsiya besprovodnykh sensorykh setey / A. V. Shapaev, A. G. Yurochkin // *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy*. 2017. No. 2 (21). pp. 86-89.
10. Bautin I. A. Modeli rasprostraneniya radiosignala WI-FI / I. A. Bautin, A. G. Yurochkin // *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy*. 2017. No. 2 (21). pp. 107-109.

11. Voronov A. A. Obespechenie sistemy upravleniya riskami pri vznikovenii ugroz informatsionnoy bezopasnosti / A. A. Voronov, I. Ya. L'vovich, Yu. P. Preobrazhenskiy, V. A. Voronov // Informatsiya i bezopasnost'. 2006. Vol. 9. No. 2. pp. 8-11.
12. L'vovich Ya. E. Issledovanie metoda trassirovki luchey pri proektirovanii besprovodnykh sistem svyazi / Ya. E. L'vovich, I. Ya. L'vovich, A. P. Preobrazhenskiy, S. O. Golovinov // Informatsionnye tekhnologii. 2011. No. 8. pp. 40-42.