

УДК 621.396

В.Н.Кострова, Е.А.Рыбальченко  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН НА  
ДВУМЕРНЫХ ЦИЛИНДРАХ**

*Воронежский институт высоких технологий*

*Применяются принципы суперпозиции для анализа нормальных плоских волн, падающих на бесконечно длинные проводящие или диэлектрические круговые цилиндры с многослойными покрытиями из магнетодиэлектрических материалов с целью минимизации или максимизация эффективной поверхности рассеяния (ЭПР). Рассмотрен случай TE и TM поляризации падающей волны. Оптимизация ЭПР методом наименьших квадратов приводит к определению толщины слоя и материала с комплексными значениями магнитной и диэлектрической проницаемости. Также проведен анализ чувствительности ЭПР с учетом геометрических параметров и параметров материала для проводящего цилиндра с магнетодиэлектрическим покрытием.*

**Ключевые слова:** связь, рассеяние электромагнитных волн, интегральные уравнения, цилиндр.

Радиолокационные системы имеют широкий спектр применений, таких как дистанционное зондирование, метеорология, медицина, наблюдение и т. д.

При численном моделировании подобных систем необходимо корректным образом определять характеристики рассеяния объектов при учете их формы и наличия различных магнито-диэлектрических материалов.

Эффективная площадь рассеяния (ЭПР) объекта является сложной функцией угла наблюдения, частоты сигнала и поляризации, материала и размеров объекта. ЭПР можно найти, основываясь на экспериментальных измерениях, но такая процедура не всегда просто реализовать на практике и применима для всех углов наблюдения и любых размеров объекта.

Таким образом, требуется численное моделирование при использовании электромагнитных методов необходимых для расчета характеристик распространения электромагнитных волн.

Частотный спектр для электромагнитных волн разделен на три области [1-3]:

- низкой частоты или области Рэлея, где размеры объекта гораздо меньше, чем длина волны, что ведет к тому, что ЭПР будет пропорциональна четвертой степени частоты;
- высокие частоты (или видимый свет), где размеры объекта намного больше, чем длины волн и успешно используются высокочастотные методики для вычисления ЭПР, такие как геометрическая оптика (ГО), физическая оптика (ФО),

геометрическая теория дифракции (ГТД), равномерная теория дифракции (РТД) и т. д.;

- средней частотной области или резонансной области, где размеры объекта сопоставимы с длинами волн и общей низкочастотной и высокочастотные приближения не применимы.

Разработаны несколько методов для расчета коэффициента отражения и ЭПР различных структур [4-7]. Расчет радиолокационного поперечного сечения в среднем частотном диапазоне требует применения таких численных методов, как метод моментов, метод FDTD, метод с использованием матрицы рассеяния, метод конечных элементов и т. д.

В данной работе мы используем подход, базирующийся на том, что рассматривается полное поле и теорема сложения для расчета ЭПР тел, представляющих собой многослойные круговых цилиндрических объекты [12-18]. Необходимо построить алгоритм, который описывает распространение электромагнитных волн в поглощающей среде. Рассматривается резонансная область, в которой размеры объектов составляли несколько длин волн.

Электромагнитные поглощающие материалы широко используются в безэховых камерах, антеннах, при электромагнитной защите от помех в высокоскоростных цепях и т. д. [8-12].

В данной работе проводится вычисление ЭПР для многослойных цилиндрических объектов, где число диэлектрических цилиндрических слоев, вообще говоря, может быть различным.

Данное исследование указывает на несколько выводов для оптимизации ЭПР, что касается значений диэлектрической и магнитной проницаемостей цилиндрических слоев, толщины слоев, частотной зависимости, поляризации падающей волны.

Используется метод наименьших квадратов для оптимизации ЭПР, хотя для этого в основном применяются генетические алгоритмы [13-17]. Вначале дано описание численной процедуры, а затем представлены несколько примеров и выводы.

На Рисунке 1 изображен бесконечно длинный проводящий или диэлектрический круговой цилиндр с радиусом  $R$ , с осью, совпадающей с осью  $Z$ . Существует несколько соосных цилиндрических диэлектрических слоев с радиусами  $R_2$ ,  $R_3$ , и т.д.

Структура находится в свободном пространстве ( $\epsilon_0$ ,  $\mu_0$ ) и временная зависимость считается в виде  $\exp(-j\omega t)$ . А ТЕ (с  $E_z = 0$ ) или ТМ (с  $H_z = 0$ ) поляризованная плоская волна это нормально падающая волна на многослойную цилиндрическую конструкцию.

Компоненты поля в цилиндрических координатах могут быть выражены на основе электрического и магнитного потенциалов Герца ( $\Pi_z, \Pi_{mz}$ ) для ТМ и ТЕ мод, соответственно, как [18-20]:

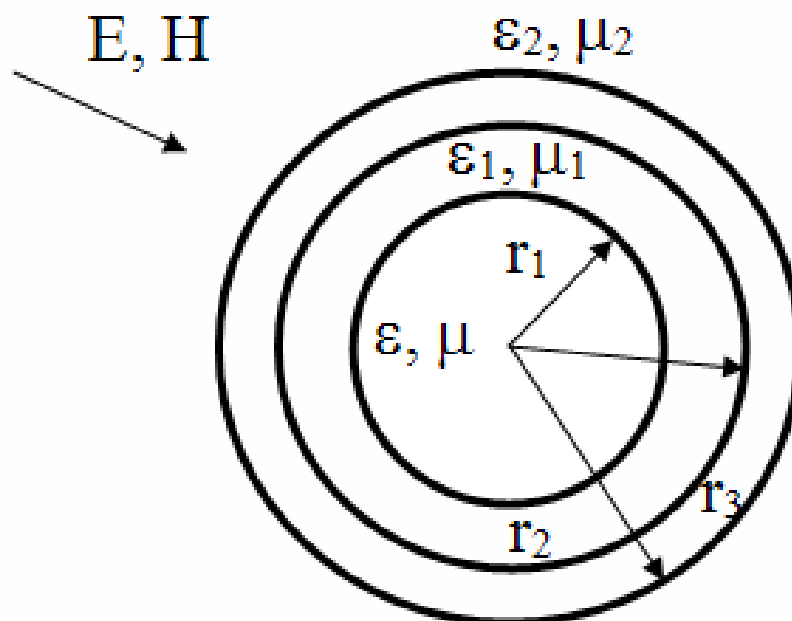


Рисунок 1 – Схема рассеяния электромагнитных волн на цилиндре

$$E_z = \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2\right)\Pi_z, \quad H_z = \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2\right)\Pi_{mz}, \quad (1)$$

$$E_r = \frac{\partial^2}{\partial r \partial z} \Pi_z - j\omega\mu\Pi_{mz}, \quad E_\varphi = \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial \varphi \partial z} \Pi_z + j\omega\mu\Pi_{mz}, \quad (2)$$

$$H_r = j\omega\varepsilon \frac{\partial}{\partial \varphi} \Pi_z + \frac{\partial^2}{\partial r \partial z} \Pi_{mz}, \quad H_\varphi = -j\omega\varepsilon \frac{\partial}{\partial r} \Pi_z + \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r \partial z} \Pi_{mz}, \quad (3)$$

где  $k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}$  - волновое число.

Падающая электромагнитная волна может быть представлена в виде суммы цилиндрических волн на основе принципа суперпозиции [21-26].

Для ТМ-волн:

$$E_z = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} j^n J_n(k_0 r) \exp(jn(\varphi - \varphi_0)), \quad (4)$$

$$H_\varphi = \frac{j}{z_0} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} j^n J'_n(k_0 r) \exp(jn(\varphi - \varphi_0)). \quad (5)$$

Для ТЕ-волн:

$$H_z = \frac{j}{Z_0} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} j^n J_n(k_0 r) \exp(jn(\varphi - \varphi_0)) \quad (6),$$

$$E_\varphi = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} j^n J'_n(k_0 r) \exp(jn(\varphi - \varphi_0)). \quad (7)$$

Здесь  $k_0$  и  $Z_0$  - это волновое число и импеданс для свободного пространства.

Рассеянное поле может быть записано в виде суммы цилиндрических волн. Для ТМ-волн:

$$E_z = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} j^n A_n H_n^{(1)}(k_0 r) \exp(jn(\varphi - \varphi_0)), \quad (8)$$

$$H_\varphi = \frac{j}{Z_0} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} j^n A_n H_n'^{(1)}(k_0 r) \exp(jn(\varphi - \varphi_0)). \quad (9)$$

Для ТЕ-волн:

$$H_z = \frac{j}{Z_0} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} j^n B_n J_n(k_0 r) \exp(jn(\varphi - \varphi_0)), \quad (10)$$

$$E_\varphi = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} j^n B_n H_n'^{(1)}(k_0 r) \exp(jn(\varphi - \varphi_0)). \quad (11)$$

Здесь  $A_n$  и  $B_n$  являются амплитудами волн, которые можно определить на основе граничных условий. Если рассматривать  $s$ -й слой, то для него электромагнитные волны записываются следующим образом. Для ТМ-волн:

$$E_{zs} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (C_{ns} J_n(k_s r) + D_{ns} Y_n(k_s r)) \exp(jn(\varphi - \varphi_0)), \quad (12)$$

$$H_{\varphi s} = \frac{j}{Z_s} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (C_{ns} J'_n(k_s r) + D_{ns} Y'(k_s r)) \exp(jn(\varphi - \varphi_0)). \quad (13)$$

Для ТЕ-волн:

$$H_{zs} = \frac{j}{Z_s} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (F_{ns} J_n(k_s r) + X_{ns} Y_n(k_s r)) \exp(jn(\varphi - \varphi_0)), \quad (14)$$

$$E_{\varphi s} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (F_{ns} J'_n(k_s r) + X_{ns} Y'_n(k_s r)) \exp(jn(\varphi - \varphi_0)). \quad (15)$$

Здесь  $k_s$  и  $Z_s$  - это волновое число и импеданс для  $s$ -го слоя.  $C_{ns}$ ,  $D_{ns}$ ,  $F_{ns}$ ,  $X_{ns}$  - неизвестные амплитуды для ТМ-волн и ТЕ-волн, которые определяются на основе использования граничных условий. Если во внутренней области находится металлический проводник, то поле равно нулю внутри него. Если мы рассматриваем диэлектрический материал, то

внутри него  $D_{ns}$  и  $X_{ns}$  равны нулю, поскольку есть сингулярность для  $Y_n(k_s r)$  при  $r=0$ .

Условие непрерывности для тангенциальных компонент поля на цилиндрических границах  $r = r_2, r_3, \dots$  и равенство нулю тангенциальных составляющих электрического поля на проводящей поверхности при  $r = r_1$  сводит задачу к совокупности линейных уравнений относительно неизвестных коэффициентов. В случае, если внутренний цилиндр с радиусом  $r_1$  изготовлен из диэлектрического материала, рассматриваются непрерывности тангенциальных компонент поля в граничных условиях на поверхности  $r = r_1$ , что дает различные совокупности линейных уравнений для амплитуд мод.

Для того, чтобы определить ЭПР нами используются следующие выражения:

Для ТМ-волн:

$$\sigma = \frac{2\lambda}{\pi} |j^n A_{ns} \exp(jn(\varphi - \varphi_0))|^2, \quad (16)$$

Для ТЕ-волн:

$$\sigma = \frac{2\lambda}{\pi} |j^n A_{ns} \exp(jn(\varphi - \varphi_0))|^2. \quad (17)$$

Оптимизация ЭПР на основе метода наименьших квадратов заключается в том, что строится функция ошибки, которую необходимо минимизировать:

$$U = \sum_{m=1}^F (\sigma_m - V)^2, \quad (18)$$

где  $V$  – требуемое значение ЭПР для частоты  $F_m$ .

Далее приведены результаты расчетов на основе рассмотренного подхода.

На Рисунке 2 приведены результаты расчетов ЭПР для следующих параметров задачи:  $r_1 = 0.28\lambda$ ,  $r_2 = 0.33\lambda$   $\epsilon_r = 4.2$ ,  $\mu_r = 1.02$ .

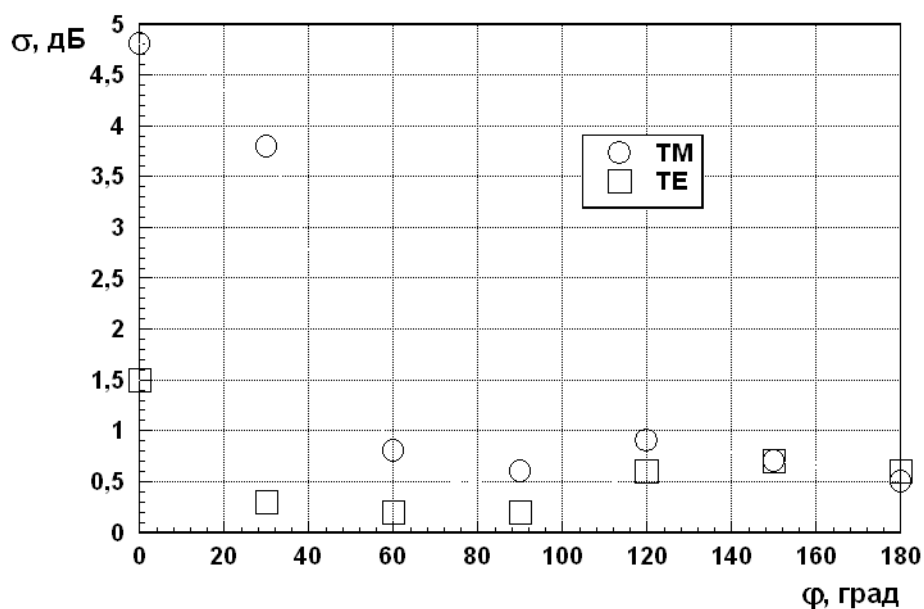


Рисунок 2 – Результаты расчетов ЭПР составного цилиндра

Был проведен поиск минимального значения ЭПР цилиндра, на основе методов оптимизации такой минимум для значения частоты 10 ГГц достигается при следующих параметрах :  $r_1 = 0.55\lambda$ ,  $\epsilon_r = 15$ ,  $\mu_r = 1$  для углов наблюдения лежащих в пределах  $10^\circ \leq \varphi \leq 20^\circ$ .

Вывод. Рассмотренный подход дает возможности для моделирования и получения результатов по характеристикам рассеяния многослойных двумерных цилиндров для резонансной области.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Махер Х.А. Разработка и использование моделей для прогнозирования качества жизни беременных по их медико-социальным характеристикам / Х.А.Махер, Н.В.Наумов, Г.Я.Клименко, О.Н.Чопоров // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2011. Т. 10. № 4. С. 789-793.
2. Преображенский А.П. Прогнозирование радиолокационных характеристик объектов с радиопоглощающими покрытиями в диапазоне длин волн / А.П.Преображенский // Телекоммуникации. 2003. № 4. С. 21-24.
3. Преображенский А.П. Перспективные методы оптимизации для решения задач проектирования электродинамических объектов и систем связи / А.П.Преображенский // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2015. № 14. С. 113-115.
4. Вычислительные методы в электродинамике / Под ред. Р. Митры. - М.: Мир, 1977. - 485 с.

5. Канавин С. В. Перспективы применения систем мобильного широкополосного доступа в сетях подвижной радиосвязи на основе стандартов mobile WIMAX и LTE / С. В. Канавин, А. С. Лукьянов // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 16. С. 79-82.
6. 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.
7. Преображенский А.П. Оценка возможностей комбинированной методики для расчета ЭПР двумерных идеально проводящих полостей / А.П.Преображенский // Телекоммуникации. 2003. № 11. С. 37-40.
8. Преображенский А.П. Алгоритм расчета радиолокационных характеристик полостей с использованием приближенной модели / А.П.Преображенский, О.Н.Чопоров // Системы управления и информационные технологии. 2005. Т. 21. № 4. С. 17-19.
9. Преображенский А.П. Аппроксимация характеристик рассеяния электромагнитных волн элементов, входящих в состав объектов сложной формы / А.П.Преображенский, Ю.П.Хухрянский // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2005. Т. 1. № 8. С. 15-16.
10. Львович И.Я. Построение алгоритма оценки средних характеристик рассеяния полых структур / И.Я.Львович, Я.Е.Львович, А.П.Преображенский // Телекоммуникации. 2014. № 6. С. 2-5.
11. Львович И.Я. Исследование устойчивости беспроводных сетей в условиях блокирования сигнала / И.Я.Львович, О.Н.Чопоров, А.П.Преображенский, В.Б.Щербаков // Информация и безопасность. 2016. Т. 19. № 2. С. 254-257.
12. Ерасов С.В. Оптимизационные процессы в электродинамических задачах / С.В.Ерасов // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2013. № 10. С. 20-26.
13. Максимова А. А. Методы исследования характеристик рассеяния электромагнитных волн объектами / А. А. Максимова, А. Г. Юрочкин // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 16. С. 53-56.
14. Баранов А.В. Проблемы функционирования mesh-сетей / А.В.Баранов // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 49-50.
15. Казаков Е.Н. Разработка и программная реализации алгоритма оценки уровня сигнала в сети wi-fi / Е.Н.Казаков // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2016. № 1(12). С. 13.

16. Щербатых С.С. Метод интегральных уравнений как основной способ анализа в САПР антенн / С.С.Щербатых // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2016. № 1(12). С. 10.
17. Пекшев Г. А. Гало-система с интерактивным управлением / Г. А. Пекшев // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 16. С. 67-71.
18. Головинов С.О. Проблемы управления системами мобильной связи / С.О.Головинов, А.А.Хромых // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 13-14.
19. Лавлинская О. Ю. Технологии облачных вычислений и их применение в решении практических задач / О. Ю. Лавлинская, Т. М. Янкис // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 16. С. 33-36.
20. Часовской А. А. Оценка перспектив внедрения облачных вычислений на предприятиях и в государственном секторе на примере ФРГ / А. А. Часовской, Е. В. Алференко // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 16. С. 94-97.
21. 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.
22. Lvovich I. The development of cad of information systems and software for diffractive structures / I. Lvovich, A. Preobrazhensky, O. Choporov // Information Technology Applications. - 2016. - № 1. - С. 107-116.
23. Lvovich Ya. Modeling of scattering of electromagnetic waves on the base of multialternative optimization / Ya. Lvovich, A. Preobrazhensky, O. Choporov / Information Technology Applications. - 2016. - № 1. - С. 117-125.
24. Преображенский А.П. Моделирование рассеяния волн на полой структуре с поглощающим материалом / А.П. Преображенский, О.Н. Чопоров, К.В. Кайдакова // В мире научных открытий. - 2015. - № 8.1 (68). - С. 523-526.
25. Преображенский А.П. Моделирование рассеяния электромагнитных волн на несимметричном объекте / А.П. Преображенский, О.Н. Чопоров, К.В. Кайдакова // В мире научных открытий. - 2015. - № 8.1 (68). - С. 526-531.
26. Преображенский А.П. Исследование характеристик рассеяния электромагнитных волн для полой структуры в объекте / А.П. Преображенский, О.Н. Чопоров, К.В. Кайдакова // В мире научных открытий. - 2015. - № 4.1 (64). - С. 548-553.



V.N. Kostrova, E.A.Rybalchenko  
**THE SIMULATION OF RADIO WAVE SCATTERING ON TWO  
DIMENSIONAL CYLINDERS**

*Voronezh Institute of High Technologies*

*We apply principles of superposition for analysis of normal of plane waves incident on an infinitely long conducting or dielectric circular cylinders with multilayer coatings made of materials with magneto-minimize or maximize the radar cross section (RCS). We consider the case of TE and TM polarizations of the incident wave. Optimization of RCS by the method of least squares leads to the determination of layer thickness and material with the complex values of the magnetic and dielectric permeability is carried out. Also the analysis of sensitivity of RCS with given geometric parameters and material parameters for a conducting cylinder coated with a magneto is given.*

**Keywords:** communication, electromagnetic wave scattering, integral equations, cylinder.

**REFERENCES**

1. Makher Kh.A. Razrabotka i ispol'zovanie modeley dlya prognozirovaniya kachestva zhizni beremennykh po ikh mediko-sotsial'nym kharakteristikam / Kh.A.Makher, N.V.Naumov, G.Ya.Klimenko, O.N.Choporov // Sistemnyy analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh. 2011. V. 10. No. 4. PP.789-793.
2. Preobrazhenskiy A.P. Prognozirovanie radiolokatsionnykh kharakteristik ob"ektov s radiopogloshchayushchimi pokrytiyami v diapazone dlin voln / A.P.Preobrazhenskiy // Telekommunikatsii. 2003. No. 4. PP. 21-24.
3. Preobrazhenskiy A.P. Perspektivnye metody optimizatsii dlya resheniya zadach proektirovaniya elektrodinamicheskikh ob"ektov i sistem svyazi / A.P.Preobrazhenskiy // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2015. No. 14. PP. 113-115.
4. Vychislitel'nye metody v elektrodinamike / Pod red. R. Mitry. - M.: Mir, 1977. - 485 p.
5. Kanavin S. V. Perspektivy primeneniya sistem mobil'nogo shirokopolosnogo dostupa v setyakh podvizhnoy radiosvyazi na osnove standartov mobile WIMAX i LTE / S. V. Kanavin, A. S. Luk'yanov // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No.16. PP. 79-82.
6. Miloshenko O.V. Metody otsenki kharakteristik rasprostraneniya radiovoln v sistemakh podvizhnoy radiosvyazi / O.V.Miloshenko // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2012. No.9. PP. 60-62.
7. Preobrazhenskiy A.P. Otsenka vozmozhnostey kombinirovannoy metodiki dlya rascheta EPR dvumernykh ideal'no provodyashchikh polostey / A.P.Preobrazhenskiy // Telekommunikatsii. 2003. No.11. PP. 37-40.
8. Preobrazhenskiy A.P. Algoritm rascheta radiolokatsionnykh kharakteristik polostey s ispol'zovaniem priblizhennoy modeli / A.P.Preobrazhenskiy,

- O.N.Choporov // Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii. 2005. V. 21. No.4. PP. 17-19.
9. Preobrazhenskiy A.P. Approksimatsiya kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnykh voln elementov, vkhodyashchikh v sostav ob"ektov slozhnoy formy / A.P.Preobrazhenskiy, Yu.P.Khukhryanskiy // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2005. V. 1. No.8. PP. 15-16.
  10. L'vovich I.Ya. Postroenie algoritma otsenki srednikh kharakteristik rasseyaniya polykh struktur / I.Ya.L'vovich, Ya.E.L'vovich, A.P.Preobrazhenskiy // Telekommunikatsii. 2014. No.6. PP. 2-5.
  11. L'vovich I.Ya. Issledovanie ustoychivosti besprovodnykh setey v usloviyakh blokirovaniya signala / I.Ya.L'vovich, O.N.Choporov, A.P.Preobrazhenskiy, V.B.Shcherbakov // Informatsiya i bezopasnost'. 2016. V. 19. No.2. PP. 254-257.
  12. Erasov S.V. Optimizatsionnye protsessy v elektrodinamicheskikh zadachakh / S.V.Erasov // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2013. No.10. PP. 20-26.
  13. Maksimova A. A. Metody issledovaniya kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnykh voln ob"ektami / A. A. Maksimova, A. G. Yurochkin // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No.16. PP. 53-56.
  14. Baranov A.V. Problemy funktsionirovaniya mesh-setey / A.V.Baranov // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2012. No.9. PP. 49-50.
  15. Kazakov E.N. Razrabotka i programmnaya realizatsii algoritma otsenki urovnya signala v seti wi-fi / E.N.Kazakov // Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii. 2016. No.1(12). PP. 13.
  16. Shcherbatykh S.S. Metod integral'nykh uravneniy kak osnovnoy sposob analiza v SAPR antenn / S.S.Shcherbatykh // Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii. 2016. No.1(12). PP. 10.
  17. Pekshev G. A. Galo-sistema s interaktivnym upravleniem / G. A. Pekshev // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No.16. PP. 67-71.
  18. Golovinov S.O. Problemy upravleniya sistemami mobil'noy svyazi / S.O.Golovinov, A.A.Khromykh // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2012. No.9. PP. 13-14.
  19. Lavlinskaya O. Yu. Tekhnologii oblachnykh vychisleniy i ikh primeneniye v reshenii prakticheskikh zadach / O. Yu. Lavlinskaya, T. M. Yankis // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No.16. PP. 33-36.
  20. Chasovskoy A. A. Otsenka perspektiv vnedreniya oblachnykh vychisleniy na predpriyatiyakh i v gosudarstvennom sektore na primere FRG / A. A.

- Chasovskoy, E. V. Alferenko // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No.16. PP. 94-97.
21. 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.
  22. Lvovich I. The development of cad of information systems and software for diffractive structures / I. Lvovich, A. Preobrazhenskiy, O. Choporov // Information Technology Applications. - 2016. - No.1. - PP. 107-116.
  23. Lvovich Ya. Modeling of scattering of electromagnetic waves on the base of multialternative optimization / Ya. Lvovich, A. Preobrazhenskiy, O. Choporov // Information Technology Applications. - 2016. - No.1. - PP. 117-125.
  24. Preobrazhenskiy A.P. Modelirovanie rasseyaniya voln na poloy strukture s pogloshchayushchim materialom / A.P. Preobrazhenskiy, O.N. Choporov, K.V. Kaydakova // V mire nauchnykh otkrytiy. - 2015. - No.8.1 (68). - PP. 523-526.
  25. Preobrazhenskiy A.P. Modelirovanie rasseyaniya elektromagnitnykh voln na nesimmetrichnom ob"ekte / A.P. Preobrazhenskiy, O.N. Choporov, K.V. Kaydakova // V mire nauchnykh otkrytiy. - 2015. - No.8.1 (68). - PP. 526-531.
  26. Preobrazhenskiy A.P. Issledovanie kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnykh voln dlya poloy struktury v ob"ekte / A.P. Preobrazhenskiy, O.N. Choporov, K.V. Kaydakova // V mire nauchnykh otkrytiy. - 2015. - No.4.1 (64). - PP. 548-553.