

УДК 621.396

Д.А.Сердюцкая

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ОБЪЕКТЕ У НЕРОВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*Воронежский институт высоких технологий*

*На основе моделирования в рамках метода интегральных уравнений рассматриваются процессы рассеяния электромагнитной волны от идеально проводящего объекта, который находится над неровной поверхностью. Закономерность изменения профиля шероховатой поверхности подчиняется гауссовому распределению. Используется подход, базирующийся на основе процедуры Монте-Карло для того, чтобы осуществить расчет функции угловых корреляций, которая зависит от расстояния объекта до поверхности, его размера и его положения относительно горизонтали. Изменение значения этой функции может использоваться для уточнения положения объекта. Проводится анализ статистических характеристик с точки зрения обнаружения объекта.*

**Ключевые слова:** рассеяние электромагнитных волн, неровная поверхность, интегральные уравнения.

Рассеяние электромагнитных волн от объектов, находящихся над неровной поверхностью представляет уже давно интерес для различных исследователей [1-3]. Это связано с возможностями более точным образом сделать прогноз по распределению поля в зоне действия антенн, так как учитывается гораздо большее число эффектов рассеяния.

Во многих случаях используют подходы, в которых описание задачи рассматривается с точки зрения замены неровной поверхности плоской диэлектрической поверхностью [1].

Но именно характеристики неровной поверхности могут значительным образом повлиять на механизмы рассеяния от объекта, если сравнивать с плоской поверхностью.

Можно рассматривать некоторые приближенные аналитические решения только для случаев небольших пределов неровности [4].

При численном моделировании рассеяния от объекта и неровной поверхности можно прийти к определенным соображениям, по решению проблем, связанным с обнаружением и выявлением объектов, находящихся под земным покровом, это может быть использовано на практике при рассмотрении распространении радиоволн в шахтах, трубах, тоннелях [5-8].

Для того, чтобы дать характеристику объекта, который находится над неровной поверхностью, можно применить функцию угловых корреляций, позволяющую изучать рассеяние от случайной поверхности со значительными неровностями.

Функция угловых корреляций является функция корреляции между двумя рассеянными полями по направлениям  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , которые

соответствуют двум значениям падающей на объект волны в  $\theta_{п1}$  и  $\theta_{п2}$ , соответственно. Расчет функции угловых корреляций проводится при усреднении реализаций по различным неровным поверхностям.

Функция угловых корреляций для полей, рассеянных неровной поверхностью, показывает сильную корреляцию, известную как эффект угловой памяти [9]. При этом соблюдается соотношение  $\sin(\theta_2) - \sin(\theta_1) = \sin(\theta_{п2}) - \sin(\theta_{п1})$ , что является следствием статистической инвариантности случайной неровной поверхности.

Методика, использующая функцию угловых корреляций, может применяться для того, чтобы обнаружить объект, который находится под покровом неровной поверхности.

Результаты показывают, что вдали от средних значений, вклад от рассеяния от неровной поверхности в значение функции угловых корреляций является небольшим.

Методика, базирующаяся на функции угловых корреляций является предпочтительной по сравнению с подходом, использующим расчет рассеянного электромагнитного поля.

В данной работе рассеянное электромагнитное поле рассчитывается на основе использования метода моментов. Исследуется зависимость функции угловых корреляций от глубины неровностей, их размеров и положения относительно горизонтали объекта.

Анализ поля, рассеянного одиночной неровной поверхностью, которая описывается на основе детерминированных законов, может быть полезным в некоторых случаях, например, при сравнении с результатами эксперимента для поверхности, которая может использоваться в практических приложениях.

В общем случае, приходится рассматривать стохастические рассеивающие свойства совокупности поверхностей с определенным статистическим распределением.

Неровная случайная поверхности часто может быть охарактеризована распределением вероятности высоты поверхности. Во многих случаях используют в качестве функции распределения вероятности высоты распределение Гаусса.

По аналогии можно использовать подходы, рассматривающие другой вид распределения. Поверхности, описываемые на основе Гауссова случайного закона, могут быть легко получены с помощью спектрального метода, который широко используется при расчете рассеяния волн [10].

На Рисунке 1 приведена схема рассеяния электромагнитных волн на объекте и неровной поверхности.

Пусть  $H_0(r)$  и  $H_1(r)$  – это магнитное поле для областей 0 и 1, соответственно. Эти поля будут удовлетворять следующим интегральным уравнениям

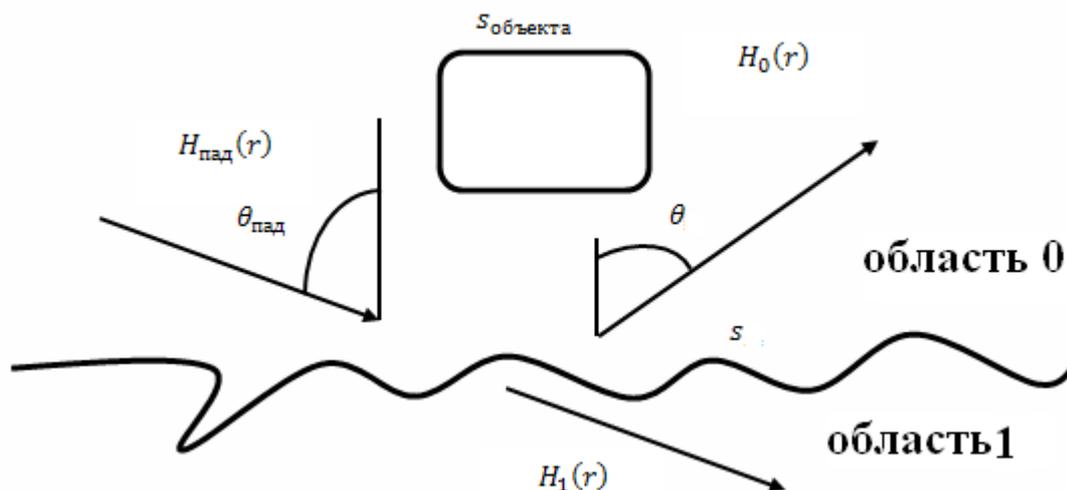


Рисунок 1 - Схема рассеяния электромагнитных волн на объекте и неровной поверхности

$$\frac{1}{2}H_0(r) = H_{пад}(r) + \int_S (H_0(r') \frac{\partial \varphi_0(r, r')}{\partial n'} - \varphi_0(r, r') \frac{\partial H_0(r')}{\partial n'}) ds' + \int_S (H_1(r') \frac{\partial \varphi_0(r, r')}{\partial n'}) ds', \quad (1)$$

где  $r \in S$  или  $S_{объекта}$ .

$$\frac{1}{2}H_1(r) = - \int_S (H_0(r') \frac{\partial \varphi_1(r, r')}{\partial n'} - \varphi_1(r, r') \frac{\partial H_1(r')}{\partial n'}) ds', \quad (2)$$

где  $r \in S$ .

В рассматриваемых уравнениях  $\varphi_0(r, r')$  и  $\varphi_1(r, r')$  - это функции Грина для области 0 и области 1, соответственно.  $\varphi_0(r, r') = (\frac{i}{4} H_0^{(1)}(k_0 |r - r'|))$ ,  $\varphi_1(r, r') = (\frac{i}{4} H_0^{(1)}(k_1 |r - r'|))$ , где  $H_0^{(1)}$  - функция Ханкеля 1-го рода. Когда  $r$  находится на поверхности  $s$ , то для полей выполняются следующие граничные условия:

$$H_0(r)|_{r \in S} = H_1(r)|_{r \in S} \quad (3)$$

где  $\gamma = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0}$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_1$  - диэлектрическая проницаемость для области 0 и 1, соответственно.

Градиент по нормали для анализируемой функции Грина рассчитывается на основе следующего выражения:

$$\frac{\partial \varphi_0(r, r')}{\partial n'} = \frac{ik}{4} l \frac{r-r'}{|r-r'|} \varphi_1(k|r-r'|), \quad (4)$$

где  $l$  – единичный вектор.

Введем обозначения

$$Q_1(x) = H_0(r)|_{x \in S}, Q_2(x) = \frac{\partial H_0(r)}{\partial n} |_{x \in S}, Q_3(x) = H_0(r)|_{x \in S_{объекта}}, \quad (5)$$

Тогда рассеянное поле в области 0 будет рассчитываться на основе следующего выражения:

$$H_{\text{рассеянное}}(r) = \frac{\exp(jkr)}{\sqrt{r}} H_r(\theta_{\text{над}}, \theta), \quad (6)$$

где

$$H_r(\theta_{\text{над}}, \theta) = \frac{i}{4} \sqrt{\frac{2}{\pi k_0}} \exp\left(-\frac{j\pi}{4}\right) \times$$

$$\times \left( \int_S (-j((nk)Q_1(x) - Q_1(x))) \exp(-jkr) \sqrt{1 + (G'(x))^2} dx - \right.$$

$$\left. - \left( \int_S (j((nk)Q_3(x)) \exp(-jkr) \sqrt{1 + (G'(x))^2} dx, \quad (7)$$

где  $k$  – волновой вектор.

При описании неровной поверхности могут быть использованы различные распределения. Например, распределение Релея:

$$p(x) = \frac{2x}{a} \exp\left(-\frac{x^2}{a}\right), \quad (8)$$

параметры этого распределения определяются на основе метода моментов.

Распределение Вейбулла:

$$p(x) = n \left(\frac{x^{n-1}}{a}\right) \exp\left(-\frac{x^n}{a}\right). \quad (9)$$

На Рисунке 2 приведен пример расчета бистатической эффективной площади рассеяния (ЭПР) для цилиндра с радиусом  $0.58\lambda$ , он располагается над неровной поверхностью, которая имеет распределение Релея с параметром  $a=10$ .

Для ускорения расчетов можно использовать методику, связанную с параллельными вычислениями [11-13].

Для частных случаев может быть проведена аппроксимация характеристик рассеяния [14].

Был проведен статистический анализ [15, 16] характеристик рассеяния при изменении  $a$  от 5 до 8, различие в дисперсиях рассеянного электромагнитного поля не превышало 23.4.

Методика расчета может быть дополнена другими методами, что позволит повысить точность оценки характеристик рассеяния в заданных секторах наблюдения [17-21].

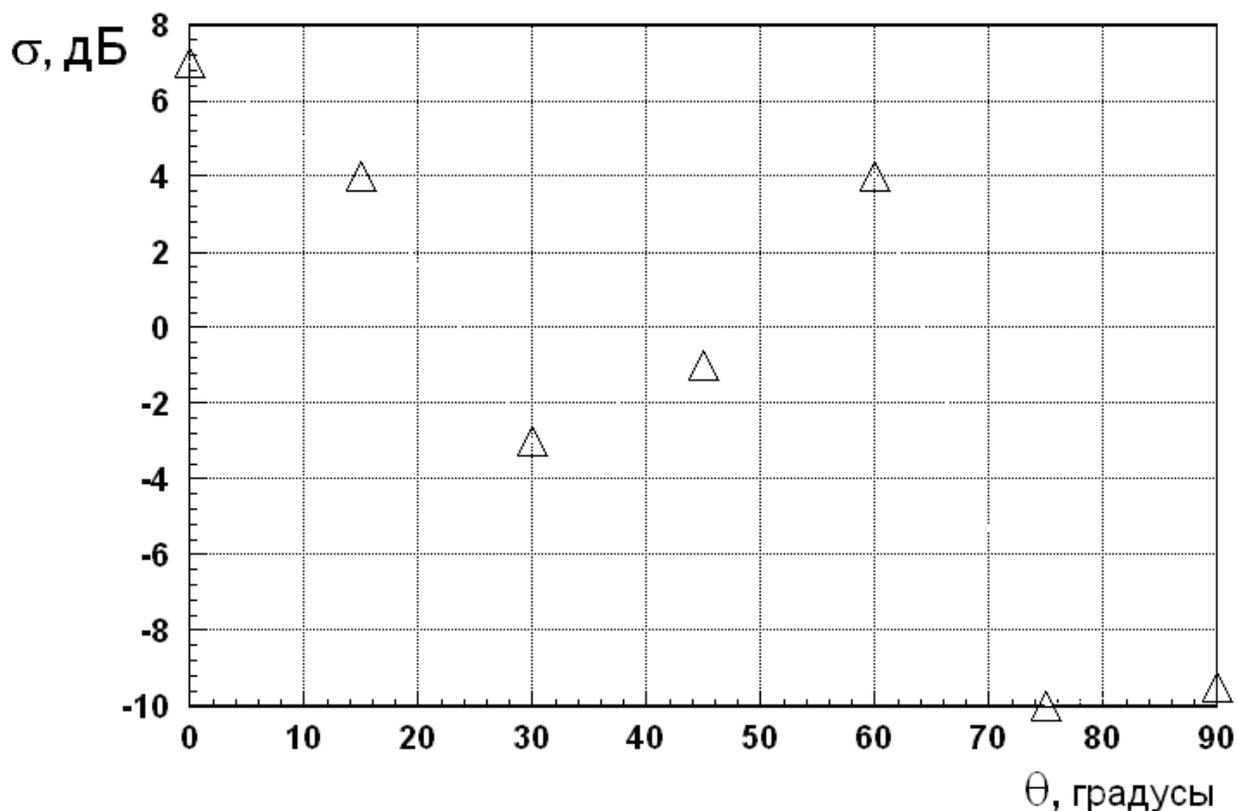


Рисунок 2 – Пример расчета бистатической ЭПР цилиндра, расположенного над неровной поверхностью.

Вывод. Рассмотренный подход дает возможности оценки характеристик рассеяния различных объектов, расположенных над

неровной проводящей поверхностью, имеющей заданный закон случайного распределения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Geng N. Wide-band VHF scattering from a trihedral reflector situated above a lossy dispersive half space / N.Geng, M. A. Ressler, L. Carin // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1999, Vol. GRS-37, No. 5, pp.2609-2617.
2. 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.
3. 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.
4. Wang X. Detection of targets buried in fractal trees by using the polarization angular correlation function / vWang , Z. Zhang, J. Fu // Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2000, Vol. 14, No. 7, pp.891-902.
5. Преображенский А.П. Оценка возможностей комбинированной методики для расчета ЭПР двумерных идеально проводящих полостей / А.П.Преображенский // Телекоммуникации. 2003. № 11. С. 37-40.
6. 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.
7. 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.
8. Головинов С.О. Проблемы управления системами мобильной связи / С.О.Головинов, А.А.Хромых // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 13-14.
9. Michel T. R. Angular correlation functions of amplitudes scattered from a one-dimensional, perfectly conducting rough surface / T. R.Michel , K. A. O'Donnell // Journal of the Optical Society of America, 1992, Vol. 9, No. 8, pp.1374-1384.

10. Gordon G. A phase-space Gaussian beam summation representation of rough surface scattering / G. Gordon, E. Heyman, R. Mazar // Journal of the Acoustical Society of America, 2005, Vol.117, pp.1911-1921.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Шутов Г.В. Оценка возможности применения приближенной модели при оценке средних характеристик рассеяния электромагнитных волн / Г.В.Шутов // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2013. № 10. С. 61-67.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. Преображенский А.П. Исследование характеристик рассеяния электромагнитных волн для полый структуры в объекте / А.П. Преображенский, О.Н. Чопоров, К.В. Кайдакова // В мире научных открытий. - 2015. - № 4.1 (64). - С. 548-553.

D.A. Serdyutskaya

## **SIMULATION OF SCATTERING OF ELECTROMAGNETIC WAVES ON THE OBJECT WITH AN UNEVEN SURFACE**

*Voronezh Institute of high technologies*

*Using the method of moments considers the processes of scattering of electromagnetic waves from perfectly conducting object located above a rough surface is carried out. The pattern of changes in the profile of a rough surface obeys a Gaussian distribution is considered. An approach based on the procedures of Monte Carlo simulation in order to carry out calculation functions, angular correlations, which depends on the distance from the surface of the object is used, its size and its position relative to the horizontal. Change the value of this function can be used to refine the position of an object. The analysis of the statistical characteristics from the point of view of object detection is carried out.*

**Keywords:** electromagnetic wave scattering, rough surface, integral equations.

## **REFERENCES**

1. Geng N. Wide-band VHF scattering from a trihedral reflector situated above a lossy dispersive half space / N.Geng, M. A. Ressler, L. Carin // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1999, Vol. GRS-37, No. 5, pp.2609-2617.
2. 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.
3. 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.
4. Wang X. Detection of targets buried in fractal trees by using the polarization angular correlation function / vWang , Z. Zhang, J. Fu // Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2000, Vol. 14, No. 7, pp.891-902.
5. 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.

6. 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. Vol. 21. No. 4. pp.17-19.
7. 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.
8. 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.
9. Michel T. R. Angular correlation functions of amplitudes scattered from a one-dimensional, perfectly conducting rough surface / T. R.Michel , K. A. O'Donnell // Journal of the Optical Society of America, 1992, Vol. 9, No. 8, pp.1374-1384.
10. Gordon G. A phase-space Gaussian beam summation representation of rough surface scattering / G. Gordon, E. Heyman, R. Mazar // Journal of the Acoustical Society of America, 2005, Vol.117, pp.1911-1921.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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. Vol. 1. No. 8. pp.15-16.
15. Boluchevskaya O.A. Svoystva metodov otsenki kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnykh voln / O.A.Boluchevskaya, O.N.Gorbenko // Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii. 2013. No. 3. pp.4.
16. Shutov G.V. Otsenka vozmozhnosti primeneniya priblizhennoy modeli pri otsenke srednikh kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnykh voln /

- G.V.Shutov // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2013. No. 10. pp.61-67.
17. Lvovich I. The development of cad of information systems and software for diffractive structures / I. Lvovich, A. Preobrazhenskiy, O. Choporov // Information Technology Applicationpp. - 2016. - No. 1. - pp.107-116.
  18. 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.
  19. 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.
  20. 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.
  21. 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.