

УДК 621.396

А.А. Максимова, В.Н.Кострова, А.А.Андросов  
**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЙЯНИЯ  
МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПИРАМИДЫ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ НА  
ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА**

*Российский новый университет  
Воронежский государственный технический университет  
Воронежский институт высоких технологий*

*Проведен анализ модели прогнозирования радиолокационных характеристик (РЛХ) идеально проводящей пирамиды в диапазоне частот, исходя из экспериментальных данных о том, каковы ее рассеивающие свойства. Для случая вертикально падающей плоской электромагнитной волны с использованием метода интегральных уравнений численным образом проведен расчет угловых зависимостей для эффективной поверхности (ЭПР) пирамиды, а также с привлечением генетического алгоритма осуществлено прогнозирование ЭПР указанного объекта в диапазоне частот.*

**Ключевые слова:** связь, радиоволны, прогнозирование, оптимизация, генетический алгоритм, интегральные уравнения, объект сложной формы.

Среди важных задач в области проектирования объектов техники, а также создания условий для электромагнитной совместимости можно выделить экспериментальные исследования радиолокационных характеристик (РЛХ) объектов в диапазоне частот [1-5].

Для того, чтобы решать такие задачи помимо того, что разрабатываются широкодиапазонные измерительные средства, использующие сверхширокополосные сигналы, формируются и проектируются новые измерительные устройства, которые являются многоканальными по частоте и позволяют осуществлять перестройку рабочей частоты, они имеют множество преимуществ [6-8].

Но, если говорить о практическом применении, то встречаются варианты, когда появляются ограничения по количеству используемых частотных каналов в различных средствах, связанных с измерениями, и числу выбираемых точек рабочих частот, относительно которых осуществляются процессы измерения РЛХ объекта.

Исходя из вышесказанного весьма актуальной является проблема, касающаяся прогнозирования РЛХ объекта для заданного диапазона частот  $[f_1, f_2]$ , основываясь на результатах экспериментальных данных по рассеивающим свойствам таких объектов для одной частоты  $f_0$ , которая принадлежит интервалу  $[f_1, f_2]$ . Существуют работы, в которых решались похожие задачи.

Например, в работе [2] проводился анализ проблем прогнозирования РЛХ объекта с привлечением информации о том, какие характеристики рассеяния для указанных размеров объекта. С точки зрения практики

может быть полезно рассмотрение случая, когда прогнозируется РЛХ объекта, тогда, когда привлекаются данные по его рассеивающим свойствам, которые известны для определенного числа значений размеров объектов [9-11].

Целью данной работы является проведение разработки модели прогнозирования РЛХ объекта для диапазона частот, основываясь на экспериментальных данных по рассеивающим свойствам таких объектов, которые имеют разные размеры, для условий падающей монохроматической волны.

Будем считать, что происходит линейный процесс рассеяния электромагнитных волн. Кроме того, будем исходить из того, что рассматриваемая РЛХ отражения объектов линейным образом определяет связь между облучающим и рассеянным полем.

С точки зрения постановки задачи, мы основываемся на соотношении, которое позволяет линейным образом связывать комплексные амплитуды для напряженностей рассеянных  $H^s(\mathbf{x})$  и падающих полей  $H^i(\mathbf{x})$  для поверхности объектов  $S$ , оно имеет следующий вид:

$$H^s(\mathbf{x})=F[D(f_0, \mathbf{x}, \mathbf{x}'), H^i(\mathbf{x})], \quad (1)$$

здесь  $D(f_0, \mathbf{x}, \mathbf{x}')$  является пространственной импульсной переходной функцией объекта (РЛХ) для заданной частоты  $f_0$ , ее мы считаем постоянной в диапазоне частот  $[f_1, f_2]$ .

В тех случаях, когда мы знаем РЛХ объектов  $D(f_0, \mathbf{x}, \mathbf{x}')$ , то на основе соотношения (1) есть возможности для того, чтобы по заданным на поверхности падающим полям  $H^i(f_0, \mathbf{x})$  провести расчеты рассеянных полей  $H^s(f_0, \mathbf{x})$  на поверхностях объектов и затем с привлечением соответствующих способов [12-14] осуществлять расчет распределения рассеянных объектами полей в пространстве для диапазоне частот  $[f_1, f_2]$ .

Так как теоретическим образом провести расчеты  $D(f_0, \mathbf{x}, \mathbf{x}')$  для многих объектов, имеющих сложную форму и неоднородные радиофизические свойства не всегда возможно, необходимо использовать для того, чтобы ее найти экспериментальные методы [15].

В этих случаях выражение (1), позволяет описать модель, в рамках которой на базе экспериментальным образом имеющихся исходных данных о том, какова РЛХ объектов  $D(f_0, \mathbf{x}, \mathbf{x}')$  на частоте  $f_0$  позволяет обеспечить проведение приближенного прогнозирования того, каким образом распределено рассеянное объектом поля для диапазона частот.

Мы предлагаем применять в модели РЛХ  $D(f_0, \mathbf{x}, \mathbf{x}')$  такую:

$$D(f_0, \mathbf{x}, \mathbf{x}')= D(f_0, \mathbf{x})\sin(|\mathbf{x}-\mathbf{x}'|). \quad (2)$$

Когда проверялась модель при прогнозе РЛХ мы выбирали диапазон частот  $[f_1, f_2]$  по некоторой частоте  $f_0$ , для которой осуществлялся расчет функции  $D(f_0, \mathbf{x}, \mathbf{x}')$  в виде (2), мы полагали, что  $f_1=f_0$ ,  $f_2=K_m \cdot f_0$ , здесь значение  $K_m$  считалось таким образом, чтобы были возможности по прогнозированию РЛХ для всего интервала частот  $[f_1, f_2]$ .

По выбранным значениям  $f$  было осуществлено в результате математического моделирования определение диаграмм рассеяния при условиях наблюдения в дальней зоне.

Было проведено прогнозирование тех же самых характеристик с привлечением вышеуказанной модели и предложенного представления переходной функции. Разница между рассчитанными и прогнозируемыми характеристиками не должны были превышать 1 дБ. Процесс прогнозирования проводился для углов наблюдения  $\alpha \in [0^\circ, 180^\circ]$ .

Для того, чтобы проверить работоспособность рассмотренной модели мы рассмотрим задачу прогнозирования эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) объекта, который представлял собой идеально проводящую пирамиду (Рисунок 1). Проведение расчета точных значений характеристик рассеяния указанного объекта осуществлялось на основе метода интегральных уравнений.

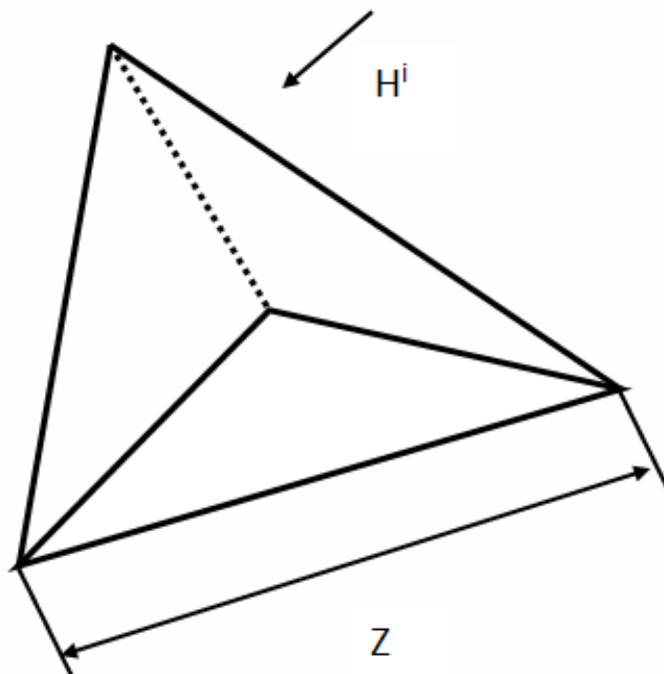


Рисунок 1 – Схема рассеяния электромагнитной волны на пирамиде

Использовалось такое интегральное уравнение Фредгольма второго рода при учете граничных условий, которое относилось к поверхности идеально проводящей пирамиды (Рисунок 1)

$$\mathbf{J}_s(\mathbf{r}) = 2\mathbf{n} \times \mathbf{H}^i(\mathbf{r}) + \frac{1}{2\pi} \mathbf{n} \times \int_s \mathbf{J}_s(\mathbf{r}') \times \text{grad}' W ds', \quad (3)$$

здесь  $W = \exp(-jkr)/r$  – является трехмерной функцией Грина для свободного пространства, которая будет решением по трехмерному уравнению Гельмгольца, когда имеем  $\delta$ -образный источник;  $s$  – поверхность пирамиды;  $\mathbf{n}$  – описывает внешнюю нормаль к поверхности пирамиды в точках наблюдения;  $\mathbf{J}_s = [\mathbf{n} \times \mathbf{H}]$  – описывает поверхностную плотность для анализируемого электрического тока;  $\mathbf{H}^i(\mathbf{r}) = \mathbf{x}H_x^i + \mathbf{y}H_y^i + \mathbf{z}H_z^i$  – является вектором для первичной плоской волны, которая вертикально поляризована.

После того, как мы применяем метод моментов, то это интегральное уравнение (3) сводится к такой системе:

$$\begin{bmatrix} R_{xx} & R_{xy} & R_{xz} \\ R_{yx} & R_{yy} & R_{yz} \\ R_{zx} & R_{zy} & R_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

здесь  $J_x, J_y, J_z$  – являются компонентами плотности поверхностного электрического тока.

Когда мы рассматриваем систему уравнений, то в ней соответствующие блоки в матрице  $R$  определяются такими выражениями:

$$\begin{aligned} (R_{xx})_{mn} &= \frac{1}{2\pi} \int_S ((n_y)_m (\text{grad}'_y)_{mn} + (n_z)_m (\text{grad}'_z)_{mn}) ds'_n - \delta_{mn}; \\ (R_{xy})_{mn} &= -\frac{1}{2\pi} \int_S (n_y)_m (\text{grad}'_x)_{mn} ds'_n; \quad (R_{xz})_{mn} = -\frac{1}{2\pi} \int_S (n_z)_m (\text{grad}'_x)_{mn} ds'_n; \\ (R_{yx})_{mn} &= -\frac{1}{2\pi} \int_S (n_x)_m (\text{grad}'_y)_{mn} ds'_n; \quad (R_{yz})_{mn} = -\frac{1}{2\pi} \int_S (n_z)_m (\text{grad}'_y)_{mn} ds'_n; \\ (R_{yy})_{mn} &= \frac{1}{2\pi} \int_S ((n_x)_m (\text{grad}'_x)_{mn} + (n_z)_m (\text{grad}'_z)_{mn}) ds'_n - \delta_{mn}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$(R_{zx})_{mn} = -\frac{1}{2\pi} \int_S (n_x)_m (\text{grad}'_z)_{mn} ds'_n ; (R_{zy})_{mn} = -\frac{1}{2\pi} \int_S (n_y)_m (\text{grad}'_z)_{mn} ds'_n ;$$

$$(R_{zz})_{mn} = \frac{1}{2\pi} \int_S ((n_x)_m (\text{grad}'_x)_{mn} + (n_y)_m (\text{grad}'_y)_{mn}) ds'_n - \delta_{mn} ,$$

где  $m, n = 1, \dots, N$ , где  $N$  – задает количество точек разбиения поверхности пирамиды.

В приведенных выше выражениях  $\delta_{mn}$  – это символ Кронекера,

$$\text{grad } W_{mn} = -\hat{r}_{mn} \frac{1 + jkr}{r_{mn}} \exp(-jkr_{mn}) =$$

$$\mathbf{i}(\text{grad}'_x)_{mn} + \mathbf{j}(\text{grad}'_y)_{mn} + \mathbf{k}(\text{grad}'_z)_{mn} , \quad (6)$$

где  $\hat{r}_{mn} = \frac{\mathbf{r}_{mn}}{|\mathbf{r}_{mn}|}$  – является единичным вектором, направленным из точки источника в точку наблюдения.

Для вектора-столбца свободных членов мы должны записать:

$$(P_x)_m = 2((n_y)_m (H_z^i)_m - (n_z)_m (H_y^i)_m) ;$$

$$(P_y)_m = -2((n_x)_m (H_z^i)_m - (n_z)_m (H_x^i)_m) ; \quad (7)$$

$$(P_z)_m = 2((n_x)_m (H_y^i)_m - (n_y)_m (H_x^i)_m) .$$

Величина коэффициента  $K_m$  определялась на основе соответствующей процедуры, использующей генетический алгоритм [17-20].

Размер популяции (первичные значения коэффициента  $K_m$ ) был 6. Для кодирования мы применяли двоичное представление аргументов функции. Мутация состояла в том, что осуществлялась инверсия по одному из битов строк.

На Рисунке 2 продемонстрированы результаты расчетов коэффициента  $K_m$  который зависел от размеров ребра пирамиды.

Можно увидеть, что происходит рост  $K_m$  линейным образом с увеличением размеров ребра пирамиды, другими словами, если мы имеем большее значение ребра пирамиды, тем мы будем иметь шире диапазон частот, для которого есть возможности по прогнозированию ее радиолокационных характеристик.

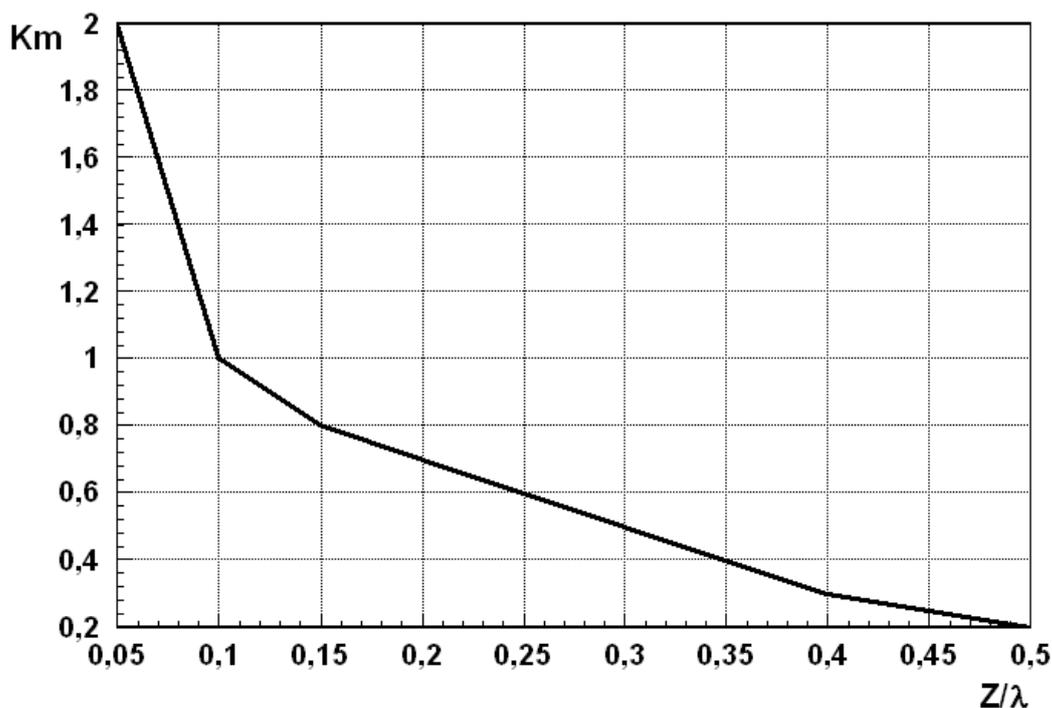


Рисунок 2 – Прогнозирование значений  $K_m$  в зависимости от ребра пирамиды  $Z$

Таким образом, на основе математического моделирования с использованием соответствующей разработанной модели были продемонстрированы и исследованы возможности прогнозирования РЛХ идеально проводящей пирамиды в диапазоне частот.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Максимова А. А. Методы исследования характеристик рассеяния электромагнитных волн объектами / А. А. Максимова, А. Г. Юрочкин // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 1. С. 53 -56.
2. Преображенский А.П. Прогнозирование радиолокационных характеристик идеально проводящей полости в диапазоне длин волн /А.П.Преображенский // Телекоммуникации. 2005. № 12. С. 29-31.
3. Преображенский А.П. Алгоритмы прогнозирования радиолокационных характеристик объектов при восстановлении радиолокационных изображений / А.П.Преображенский, О.Н.Чопоров // Системы управления и информационные технологии. 2004. Т. 17. № 5. С. 85-87.
4. Преображенский А.П. Прогнозирование радиолокационных характеристик объектов с радиопоглощающими покрытиями в

- диапазоне длин волн / А.П. Преображенский // Телекоммуникации. 2003. № 4. С. 21-24.
5. Преображенский А.П. Прогнозирование радиолокационных характеристик объектов в диапазоне длин волн с использованием результатов измерения характеристик рассеяния на дискретных частотах / А.П.Преображенский // Телекоммуникации. 2004. № 5. С. 32-35.
  6. 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. № 1. С. 79-82.
  7. Львович И.Я. Программный комплекс для автоматизированного анализа характеристик рассеяния объектов с применением математических моделей / И.Я.Львович, А.П.Преображенский, Р.П.Юров, О.Н.Чопоров // Системы управления и информационные технологии. 2006. Т. 24. № 2. С. 96-98.
  8. Васильев Е.М. Многоальтернативное управление в хаотических системах связи / Е.М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 11. С. 155-158.
  9. Львович И.Я. Расчет характеристик металлodieлектрических антенн / И.Я.Львович, А.П.Преображенский // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2005. Т. 1. № 11. С. 26-29.
  10. Львович И.Я. Разработка информационного и программного обеспечения САПР дифракционных структур и радиолокационных антенн / И.Я.Львович, А.П.Преображенский // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2006. Т. 2. № 12. С. 63-68.
  11. 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. С. 526.
  12. 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.
  13. 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.

14. Преображенский А.П. Оценка возможностей комбинированной методики для расчета ЭПР двумерных идеально проводящих полостей / А.П.Преображенский // Телекоммуникации. 2003. № 11. С. 37-40.
15. Преображенский А.П. Исследование возможности определения формы объекта в окрестности восстановления локальных отражателей на поверхности объектов по их диаграммам обратного рассеяния / А.П. Преображенский // Телекоммуникации. 2003. № 4. С. 29-32.
16. Lvovich Y.Y. The use of "ant" algorithm in constructing models of objects that have maximum average values of the scattering characteristics / Y.Y.Lvovich, I.Y.Lvovich, A.P.Preobrazhenskiy, O.N.Choporov // Life Science Journal. 2014. Т. 12. № 12. С. 463.
17. Васильев Е.М. Эволюционные алгоритмы с матричной репликацией / Е.М.Васильев, И.В.Крутских // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 2. С. 21-23.
18. Подвальный С.Л. Эволюционные принципы построения интеллектуальных систем многоальтернативного управления / С.Л.Подвальный, Е.М.Васильев // Системы управления и информационные технологии. 2014. Т. 57. № 3. С. 4-8.
19. Ткалич С.А. Основания и возможности использования искусственных нейросетей в системах прогнозирования / С.А.Ткалич, Е.М.Васильев // Электротехнические комплексы и системы управления. 2008. № 2. С. 37-38.
20. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д.Рутковская, М.Пилинский, Л.Рутковский // Издательство: Горячая линия-Телеком, 2006, 383 с.

A. A. Maksimova, V. N. Kostrova, A. A. Androsov  
**THE PREDICTION OF THE SCATTERING CHARACTERISTICS OF  
METAL PYRAMIDS IN THE FREQUENCY RANGE BASED ON THE  
USE OF GENETIC ALGORITHM**

*Russian New University  
Voronezh State Technical University  
Voronezh Institute of High Technologies*

*The analysis model of prediction of radar characteristics is conducting pyramid in the frequency range on the basis of experimental evidence, what is its scattering properties is given. For the case of a vertically incident plane electromagnetic wave using the method of integral equations by numerical way, the calculation of the angular dependences for radar cross section of the pyramid, as well as with the involvement of a genetic algorithm made a prediction of RCS for the specified object in the frequency range is carried out.*

**Keywords:** communication, radio waves, forecasting, optimization, genetic algorithm, integral equations, objects with complex shape.

#### REFERENCES

1. Maksimova A. A. Metody issledovaniya kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnykh voln ob"ektami / A. A. Maksimova, A. G. Yurochkin // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. № 1. S. 53 -56.
2. Preobrazhenskiy A.P. Prognozirovaniye radiolokatsionnykh kharakteristik ideal'no provodyashchey polosti v diapazone dlin voln /A.P.Preobrazhenskiy // Telekommunikatsii. 2005. № 12. S. 29-31.
3. Preobrazhenskiy A.P. Algoritmy prognozirovaniya radiolokatsionnykh kharakteristik ob"ektov pri vosstanovlenii radiolokatsionnykh izobrazheniy / A.P.Preobrazhenskiy, O.N.Choporov // Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii. 2004. T. 17. № 5. S. 85-87.
4. Preobrazhenskiy A.P. Prognozirovaniye radiolokatsionnykh kharakteristik ob"ektov s radiopogloshchayushchimi pokrytiyami v diapazone dlin voln / A.P. Preobrazhenskiy // Telekommunikatsii. 2003. № 4. S. 21-24.
5. Preobrazhenskiy A.P. Prognozirovaniye radiolokatsionnykh kharakteristik ob"ektov v diapazone dlin voln s ispol'zovaniem rezul'tatov izmereniya kharakteristik rasseyaniya na diskretnykh chastotakh / A.P.Preobrazhenskiy // Telekommunikatsii. 2004. № 5. S. 32-35.
6. 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. № 1. S. 79-82.

7. L'vovich I.Ya. Programmnyy kompleks dlya avtomatizirovannogo analiza kharakteristik rasseyaniya ob"ektov s primeneniem matematicheskikh modeley / I.Ya.L'vovich, A.P.Preobrazhenskiy, R.P.Yurov, O.N.Choporov // Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii. 2006. T. 24. № 2. S. 96-98.
8. Vasil'ev E.M. Mnogoal'ternativnoe upravlenie v khaoticheskikh sistemakh svyazi / E.M. Vasil'ev // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2012. T. 8. № 11. S. 155-158.
9. L'vovich I.Ya. Raschet kharakteristik metallodielektricheskikh antenn / I.Ya.L'vovich, A.P.Preobrazhenskiy // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2005. T. 1. № 11. S. 26-29.
10. L'vovich I.Ya. Razrabotka informatsionnogo i programmno obespecheniya SAPR difraktsionnykh struktur i radiolokatsionnykh antenn / I.Ya.L'vovich, A.P.Preobrazhenskiy // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2006. T. 2. № 12. S. 63-68.
11. 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. № 8. S. 526.
12. 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. № 6. S. 2-5.
13. 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. T. 21. № 4. S. 17-19.
14. Preobrazhenskiy A.P. Otsenka vozmozhnostey kombinirovannoy metodiki dlya rascheta EPR dvumernykh ideal'no provodyashchikh polostey / A.P.Preobrazhenskiy // Telekommunikatsii. 2003. № 11. S. 37-40.
15. Preobrazhenskiy A.P. Issledovanie vozmozhnosti opredeleniya formy ob"ekta v okrestnosti vosstanovleniya lokal'nykh otrazhateley na poverkhnosti ob"ektov po ikh diagrammam obratnogo rasseyaniya / A.P. Preobrazhenskiy // Telekommunikatsii. 2003. № 4. S. 29-32.
16. Lvovich Y.Y. The use of "ant" algorithm in constructing models of objects that have maximum average values of the scattering characteristics / Y.Y.Lvovich, I.Y.Lvovich, A.P.Preobrazhenskiy, O.N.Choporov // Life Science Journal. 2014. T. 12. № 12. S. 463.
17. Vasil'ev E.M. Evolyutsionnye algoritmy s matrichnoy replikatsiyey / E.M.Vasil'ev, I.V.Krutskiy // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2011. T. 7. № 2. S. 21-23.

18. Podval'nyy S.L. Evolyutsionnye printsipy postroeniya intellektual'nykh sistem mnogoal'ternativnogo upravleniya / S.L.Podval'nyy, E.M.Vasil'ev // Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii. 2014. T. 57. № 3. S. 4-8.
19. Tkalich S.A. Osnovaniya i vozmozhnosti ispol'zovaniya iskusstvennykh neyrosetey v sistemakh prognozirovaniya / S.A.Tkalich, E.M.Vasil'ev // Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya. 2008. № 2. S. 37-38.
20. Rutkovskaya D. Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy / D.Rutkovskaya, M.Pilins'kiy, L.Rutkovskiy // Izdatel'stvo: Goryachaya liniya-Telekom, 2006, 383 s.