

УДК 621.396

А.Г. Юрочкин, А.В. Данилова, И.А. Гусарова
**ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИТЕРАЦИОННОГО
МЕТОДА ПРИ РАСЧЕТАХ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ
КОМБИНИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ**

*Воронежский филиал Российской Академии государственной службы при
Президенте Российской Федерации
ОАО «Концерн «Созвездие»
Воронежский институт высоких технологий*

В работе рассматривается рассеяние радиоволн на комбинированном объекте, состоящем из нескольких компонентов. Одним из возможных способов, который анализируется – применение метода интегральных уравнений. Но при большом размере контуров и при увеличении числа компонентов время, требуемое для расчетов, значительно увеличивается. В этой связи, рассматривается итерационный метод, в котором учитываются только токи, которые относятся непосредственно к переотражению между компонентами, что ведет к уменьшению размеров матрицы линейных уравнений и общему уменьшению времени расчетов. Приведен пример, когда в качестве комбинированного объекта рассматривается совокупность эллиптических двумерных цилиндров. Определены характерные размеры, при которых хорошо работает итерационный метод.

Ключевые слова: связь, дифракция, распространение волн, метод интегральных уравнений, итерация, цилиндр.

Введение. В настоящее время весьма актуальным является проведение разработок способов, связанных с расчетом характеристик рассеяния объектов, которые имеют сложную форму [1-4].

С точки зрения практического применения представляет интерес формирование на основе известных подходов комбинированных или гибридных способов расчетов, дающих возможности для экономии машинных ресурсов (например, имеют ввиду память, время) [5-7].

Целью данной работы является проведение исследований возможностей по применению итеративного алгоритма для осуществления расчетов характеристик рассеяния электромагнитных волн комбинированных объектов, то есть тех, которые состоят из нескольких отдельных компонентов.

Методика. Полагаем, что электрическое поле (случай E-поляризации) для произвольной точки наблюдения $E(x_0, y_0)$.

При этом точку (x_0, y_0) мы размещаем в сечении S поглощающего покрытия, а также на контур металла.

Исходя из использования граничных условий возникает система интегральных уравнений. Это уравнения Фредгольма 1-го рода [8, 9].

$$\begin{aligned}
 E_0(x_0, y_0) + \int_{\substack{L_x \\ \in L_x}} j_1(t) G_1(r) h(t) dt + \int_{L_m} m_1(t) G_1(r) h(t) dt = 0, \text{ для } (x_0, y_0) \\
 \int_{L_x} j_2(t) G_2(r) h(t) dt + \int_{L_m} m_2(t) G_2(r) h(t) dt = 0, \text{ для } (x_0, y_0) \in L_x \\
 - \int_{L_m} m_1(t) G_1(r) h(t) dt + \int_{L_m} m_2(t) G_2(r) h(t) dt - \int_{L_x} j_1(t) G_1(r) h(t) dt + \\
 + \int_{L_x} j_2(t) G_2(r) h(t) dt = E_0(x_0, y_0), \text{ для } (x_0, y_0) \in L_m \\
 - \frac{1}{2} m_1(\rho) - \frac{1}{2} m_2(\rho) + \int_{L_m} m_1(t) \frac{\partial G_1(r)}{\partial n} h(t) dt - \int_{L_m} m_2(t) \frac{\partial G_2(r)}{\partial n} h(t) dt - \\
 - \frac{i}{4} \int_{L_x} j_1(t) \frac{\partial G_1(r)}{\partial n} h(t) dt - \int_{L_x} j_2(t) \frac{\partial G_2(r)}{\partial n} h(t) dt = \frac{E_0(x_0, y_0)}{\partial n}, \text{ для } \\
 (x_0, y_0) \in L_m.
 \end{aligned}$$

Здесь j_1, m_1 – это плотности потенциалов по внешним сторонам контуров L_x (металлическая поверхность) и L_m (диэлектрик) соответственно;

j_2, m_2 – дают обозначения по значениям плотностей потенциалов для внутренних сторон контура,

$E_0(x_0, y_0)$ – является падающей плоской электромагнитной волной,

α – угол под которым падает и наблюдается волна (Рисунок 1),

$G_1(r)$ – является двумерной функцией Грина, которая относится к бесконечной области, ей соответствует волновое число $k=2\pi/\lambda$,

λ - обозначает длину волны для областей в свободном пространстве,

$G_2(r)$ – дает обозначение для двумерной функции Грина, которая относится к бесконечной области, которая имеет волновое число $k=(2\pi/\lambda)\sqrt{\epsilon\mu}$,

r – является расстоянием, которое будет между исходными точками и точками наблюдения,

h – показывает, какой коэффициент Ламе для контура L .

Рассеянное электромагнитное поле рассчитывалось исходя из того, какие были соответствующие формулы [10, 11].

Мы проводили анализ для такого объекта (Рисунок 1). Он представляет собой решетку из трех двумерных эллиптических

цилиндров, которые имели соответствующие размеры, есть их сдвиг цилиндров друг относительно друга, введен шаг U .

Когда осуществляется расчет в рамках метода интегральных уравнений, то был применен подход (1)-(3), который относился ко всему объекту, другими словами в качестве поверхности интегрирования мы рассматривали обобщение по поверхностям всех цилиндров.

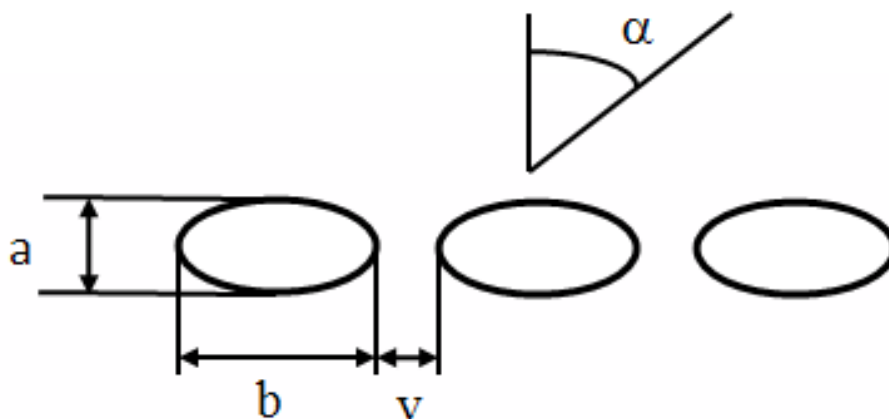


Рисунок 1 – Иллюстрация рассеяния E-поляризованной электромагнитной волны на объекте, который представляет собой совокупность цилиндров.

Итерационный метод применялся такой способ [12], который до этого рассматривался при процессах разбиения объектов на кластеры.

В ряде случаев удобно применять методы искусственного интеллекта [13-17].

Мы делаем представление матрицы импедансов, относящейся к системе уравнений как сумму двух компонентов:

$$Z = Z_{\text{ближнее}} + Z_{\text{дальнее}}. \quad (4)$$

В указанном выражении члены, которые входят в $Z_{\text{ближнее}}$, относятся к процессам взаимодействия среди точек, которые относятся к поверхности на одном том же цилиндре, а члены, которые входят в $Z_{\text{дальнее}}$, относятся к процессам взаимодействия среди точек, которые лежат на поверхностях соседних цилиндров.

Для матрицы импедансов мы можем записать такое выражение

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & Z_{N-1,N-2} & Z_{N-1,N-1} & Z_{N-1,N} \\ 0 & \cdot & \cdot & 0 & Z_{N,N-1} & Z_{N,N} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

здесь N – является общим числом точек разбиения по всем цилиндрам.

Причем члены, которые стоят на главной диагонали, позволяют сформировать $Z_{\text{ближнее}}$, а члены, которые стоят на других двух диагоналях, позволяют сформировать $Z_{\text{дальнее}}$.

Важно сделать представление обратной матрицы Z^{-1} через $Z_{\text{ближнее}}$ и $Z_{\text{дальнее}}$. Сделаем представление выражения (4) как

$$Z = Z_{\text{ближнее}}(I + Z_{\text{ближнее}}^{-1}Z_{\text{дальнее}}), \quad (6)$$

где I – является единичной матрицей. В этом случае для обратной матрицы импедансов мы запишем

$$Z^{-1} = (I - D)^{-1}Z_{\text{ближнее}}^{-1}, \quad (7)$$

где $D = -Z_{\text{ближнее}}^{-1}Z_{\text{дальнее}}$.

В норме матрицы

$$\|A\|_p = \sup_{x \neq 0} \frac{\|Ax\|_p}{\|x\|_p}, \quad (8)$$

где x – вектор, а $\|x\|_p$ - представляет собой традиционную норму вектора. Существует свойство, которое относится к двум матрицам A и B $\|AB\| = \|A\| \|B\|$, причем не был приведен для упрощения индекс p . Кроме того, мы можем показать, что

$$\|A^{-1}\|_p \leq \frac{1}{1 - \|I - A\|}, \quad (9)$$

отсюда

$$\|D\| = \|-Z_{\text{ближнее}}^{-1}Z_{\text{дальнее}}\| \leq \frac{\|Z_{\text{дальнее}}\|}{1 - \|I - Z_{\text{ближнее}}\|}. \quad (10)$$

Кроме того, мы предполагаем, что $\|Z_{\text{ближнее}}\| \gg \|Z_{\text{дальнее}}\|$. И наконец, мы исходим из того, что $\|D\| < 1$. Ориентируясь на то, что $\|D\| < 1$, мы сделаем разложение в ряд Неймана

$$(I - D)^{-1} = \sum_{n=0}^{\infty} D^n. \quad (11)$$

По формулам (7) и (11) мы получаем

$$Z^{-1}J = \left[\sum_{n=0}^{\infty} (-Z_{\text{ближнее}}^{-1}Z_{\text{дальнее}})^n \right] Z_{\text{ближнее}}^{-1}J. \quad (12)$$

При расчетах нами было установлено, что вклад от $(-Z_{\text{ближнее}}^{-1}Z_{\text{дальнее}})^n$ быстрым образом уменьшается, когда идет увеличение n , и в результате, требуется рассматривать только небольшое число членов когда идет разложение

$$Z^{-1}J \approx \left[\sum_{n=0}^{M-1} (-Z_{\text{ближнее}}^{-1}Z_{\text{дальнее}})^n \right] Z_{\text{ближнее}}^{-1}J. \quad (13)$$

Результаты. При осуществлении расчетов нами проводилось сравнение ЭПР, которая была получена на базе двух подходов, в секторе углов $\alpha \in [0^\circ, 35^\circ]$, поскольку наши исследования показали, что итерационный подход эффективно работает лишь в этом секторе углов. Осуществление расчетов при помощи метода интегральных уравнений нами рассматривалось как методика для того, чтобы получать экспериментальные данные (то есть, осуществлялся машинный эксперимент). Разница для значений ЭПР, которые получались на базе таких двух способов, не должна была быть больше, чем 1 дБ (говорится об экспериментальной погрешности). Нами было установлено, что для того, чтобы осуществлять расчеты требуется брать число итераций $M=6$. Это может быть использовано в системах проектирования дифракционных структур [18-20].

Мы зафиксировали размеры цилиндров по длинной стороне $b=4\lambda$.

За счет того, что производилось варьирование размеров цилиндров по меньшей стороне, были определены границы a_{\min} и a_{\max} , в которых работает итерационный метод. На Рисунке 2 дана зависимость $a_{\min}(v)$ и $a_{\max}(v)$.

Проведенные оценки для затрачиваемого времени по расчетам указанных задач продемонстрировали, что осуществление расчетов исходя

из итерационного метода дает возможности по сокращению такого времени приблизительно в три раза.

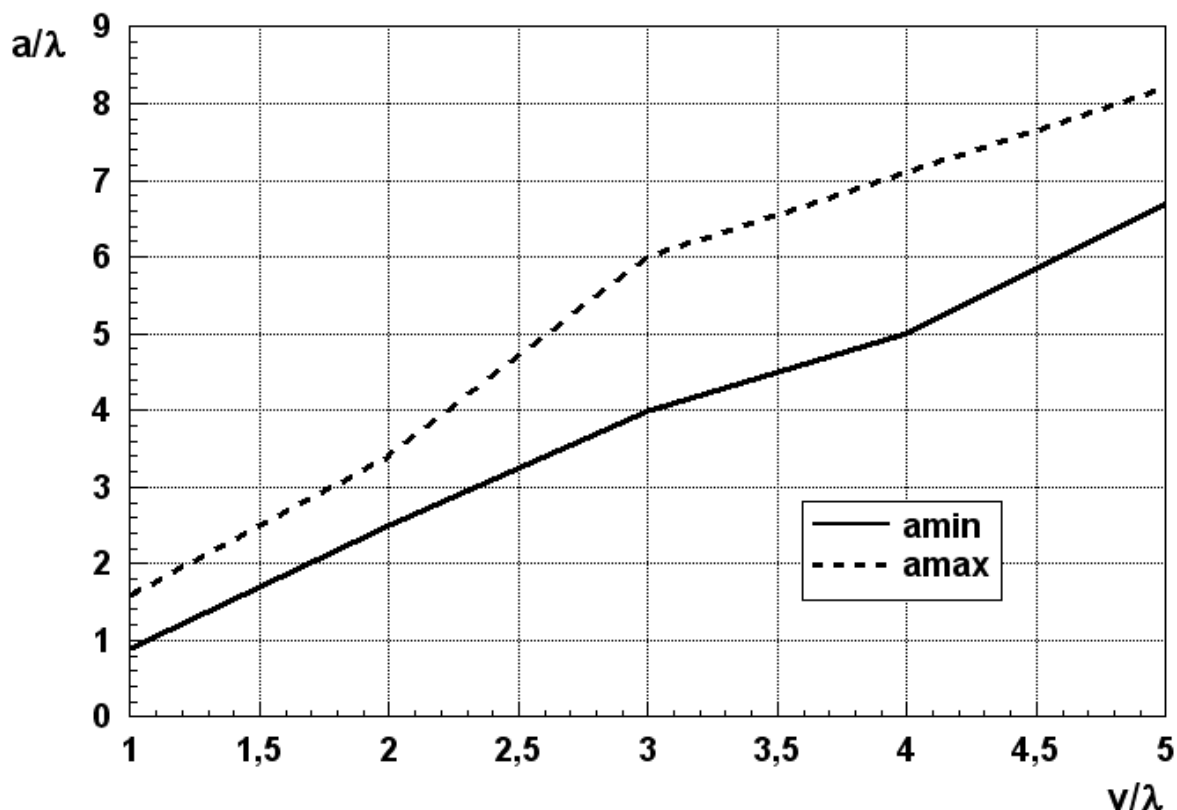


Рисунок 2 – Значения $a_{\min}(v)$ и $a_{\max}(v)$, для которых работает итерационный способ.

Вывод. В статье мы рассмотрели характеристики итерационного метода, в рамках которого появляется возможность для того, чтобы проводить расчеты характеристик рассеяния комбинированных объектов. Исходя из такого подхода, мы можем уменьшать время, которое необходимо для того, чтобы делались расчеты характеристик рассеяния, в несколько раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Львович И.Я. Расчет характеристик металлодиэлектрических антенн / И.Я.Львович, А.П.Преображенский // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2005. Т. 1. № 11. С. 26-29.
2. 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.
3. 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.
 4. 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.
 5. 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.
 6. Преображенский А.П. Прогнозирование радиолокационных характеристик идеально проводящей полости в диапазоне длин волн /А.П.Преображенский // Телекоммуникации. 2005. № 12. С. 29-31.
 7. 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.
 8. 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.
 9. Преображенский А.П. Оценка возможностей комбинированной методики для расчета ЭПР двумерных идеально проводящих полостей / А.П.Преображенский // Телекоммуникации. 2003. № 11. С. 37-40.
 10. 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.
 11. 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.
 12. Targets Zhijun Liu MLFMA-based quasi-direct analysis of scattering from electrically large targets / Targets Zhijun Liu, Lawrence Carin. (www.ee.duke.edu/~lcarin/zhijun02b.pdf).

13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Васильев Е.М. Многоальтернативное управление в хаотических системах связи / Е.М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 11. С. 155-158.
18. 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.
19. Преображенский А.П. Прогнозирование радиолокационных характеристик объектов с радиопоглощающими покрытиями в диапазоне длин волн / А.П. Преображенский // Телекоммуникации. 2003. № 4. С. 21-24.
20. 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.

A. G. Yurochkin, A.V.Danilova, I.A.Gusarova
**THE POSSIBILITY OF USING ITERATIVE METHOD FOR THE
CALCULATIONS OF SCATTERING CHARACTERISTICS OF
COMBINED OBJECTS**

*Voronezh branch of the Russian Academy of state service under the President of
the Russian Federation
JSC "Concern "Sozvezdie"
Voronezh Institute of High Technologies*

This paper considers the scattering of radio waves on the combined object consisting of several components. One of the possible ways, which is analyzed by the application of the method of integral equations. But with a large size of circuits and an increase in the number of components the time required for calculations increases significantly. In this regard, the iterative method is considered, which takes into account only the currents that are related directly to the reflection between components, which leads to a reduction in the size of the matrix of linear equations and an overall reduction in the computation time. Given an example, when as a combined object is a combination of two-dimensional elliptic cylinders. Characteristic size at which the iterative method works well.

Keywords: communication, diffraction, wave propagation, method of integral equations, iteration, cylinder.

REFERENCES

1. 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.
2. L'vovich I.Ya. Razrabotka informatsionnogo i programmnoho 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Preobrazhenskiy A.P. Prognozirovaniye radiolokatsionnykh kharakteristik

- ideal'no provodyashchey polosti v diapazone dlin voln /A.P.Preobrazhenskiy // Telekommunikatsii. 2005. № 12. S. 29-31.
7. 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.
 8. 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.
 9. Preobrazhenskiy A.P. Otsenka vozmozhnostey kombinirovannoy metodiki dlya rascheta EPR dvumernykh ideal'no provodyashchikh polostey / A.P.Preobrazhenskiy // Telekommunikatsii. 2003. № 11. S. 37-40.
 10. 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.
 11. 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.
 12. Targets Zhijun Liu MLFMA-based quasi-direct analysis of scattering from electrically large targets / Targets Zhijun Liu, Lawrence Carin.
 13. (www.ee.duke.edu/~lcarin/zhijun02b.pdf).
 14. 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.
 15. Vasil'ev E.M. Evolyutsionnye algoritmy s matrichnoy replikatsiey / E.M.Vasil'ev, I.V.Krutsikikh // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2011. T. 7. № 2. S. 21-23.
 16. 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.
 17. 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.
 18. 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.
 19. 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.

20. Preobrazhenskiy A.P. Prognozirovaniye radiolokatsionnykh kharakteristik ob"ektov s radiopogloshchayushchimi pokrytiyami v diapazone dlin voln / A.P. Preobrazhenskiy // Telekommunikatsii. 2003. № 4. S. 21-24.
21. 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.