

УДК 621.396

А.А. Жилина, В.Н. Кострова

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ПОГЛОЩАЮЩИМИ  
КОМПОНЕНТАМИ В ЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ**

*Российский новый университет, Москва, Россия  
Воронежский государственный технический университет,  
Воронеж, Россия*

*Актуальность исследования обусловлена тем, что в современных электродинамических системах при их моделировании и проектировании исследователи не всегда имеют информацию о ее функционировании в заданном частотном диапазоне. В данной статье рассматривается методика прогнозирования радиолокационных характеристик (РЛХ) металлических объектов, содержащих поглощающие компоненты, в некотором частотном диапазоне, при этом используются данные о том, какие рассеивающих свойства компонентов этих объектов. Ведущим подходом к исследованию данной проблемы является использование аппарата функции Грина. Рассеянные электромагнитные поля рассчитывались на базе метода интегральных уравнений. При учете поглощающей компоненты использовались импедансные граничные условия. Даны примеры прогнозирования РЛХ в случае, когда на объект падает E-поляризованная плоская электромагнитная волна. Была проведена аппроксимация характеристик рассеяния в заданном секторе углов на основе алгебраического полинома, приведены коэффициенты полинома. Был разработан алгоритм синтеза размеров объекта на основе данных прогнозирования уровней электромагнитных волн. Приведена зависимость ошибки прогнозирования значений электромагнитного поля от полосы частот. Материалы статьи представляют практическую ценность для специалистов, связанных с разработкой сложных электродинамических структур.*

**Ключевые слова:** радиосвязь, рассеяние электромагнитных волн, прогнозирование, поглощение, частотный анализ, синтез.

**Введение.** Во многих практически важных задачах, связанных с проведением разработок и проектированием составляющих, современных радиоэлектронных систем, способных как к излучению, так и рассеиванию электромагнитных волн, необходимо обеспечивать требуемый уровень электромагнитного поля. В настоящее время можно наблюдать развитие широкодиапазонных средств, базирующихся на сверхширокополосных сигналах, идет формирование и внедрение объектов, использующих принцип многоканальности по частотам. Могут создаваться новые устройства, использующие принцип перестройки рабочих частот [1, 2].

С точки зрения разработки новых алгоритмов обработки информации можно считать актуальной задачу, которая направлена на прогнозирование рассеивающих свойств радиотехнических устройств в определенном частотном диапазоне  $[f_1, f_2]$ , на основе информации о том, как рассеивается электромагнитная волна на разных компонентах

объектов. На настоящий момент уже созданы методики, которые были получены некоторыми авторами [3-5].

Целью настоящей статьи является разработка алгоритма, на основе которого можно проводить прогнозирование рассеивающих характеристик идеально проводящих объектов с поглощающими компонентами в частотном диапазоне, базирующимся на методе интегральных уравнений [6, 7].

**Методика исследования.** Для описания связи комплексных амплитуд по напряженностям для рассеянного поля  $E_s(r)$  и падающего на идеально проводящий объект поля  $E_i(r)$ , используем интегральное соотношение [1, 2]:

$$E_s(f, r) = \int_C G(f_0, r, r_1) E_i(f, r_1) dr_1, \quad (1)$$

при этом  $C$  – дает обозначение контура анализируемого объекта (в исследуемом двумерном случае).

Если рассматривать объект, имеющий произвольную форму, в том числе с поглощающими компонентами, то определить его характеристику рассеяния  $G(f_0, r, r_1)$  на основе теоретических подходов не всегда представляется возможным, в этой связи необходимо применять различные экспериментальные способы. Поэтому можно по информации о том, какие рассеивающие свойства объектов на одной из частот провести оценку приближенных значений их рассеивающих характеристик относительно других частот, а также по заданному диапазону частот.

Было предложено использовать такую модель для  $G(f_0, r, r_1)$ :

$$G(\lambda_0, r, r_1) = G(\lambda_0, r) \delta(r - r_1). \quad (2)$$

При этом идет аппроксимация характеристики рассеяния на основе линейной зависимости. Мы будем исходить из того, что есть информация по значениям характеристик рассеяния для  $m$  точек по каждой из аппроксимирующим прямым. Полагаем, что функция  $G$ , исходя из ее определения, будет вычисляться следующим образом:  $G = G_L = E_{\text{рас}}/E_{\text{пад}}$ , здесь  $E_{\text{рас}}$  – представляет собой рассеянное поле,  $E_{\text{пад}}$  – представляет собой падающее поле. Вычисление функции  $G$  будет проводиться при учете того, что существует информация по ее значениям, соответствующим нескольким значениям размера  $L$  объекта следующим образом:

$$G = \sum_m \beta_m \cdot \frac{E_{nao}^f}{E_{nao}^{f_0}}, \quad (3)$$

здесь  $E_{nad}^f$  - представляет собой падающую волну, соответствующую частоте  $f$ ,  $E_{nad}^{f_0}$  - представляет собой падающую волну с частотой  $f_0$ , вычисление коэффициентов  $\beta_m$  происходит для соответствующих точек  $m$  в рассматриваемом частотном диапазоне.

С тем, чтобы оценить возможности применения предлагаемого алгоритма, проводилось моделирование рассеяния волны, имеющей E-поляризацию на объекте, который изображен на Рисунок 1. Поглощающая компонента имела толщину  $D$ , диэлектрическая проницаемость материала  $\epsilon = \epsilon_1 + j\epsilon_2$ .

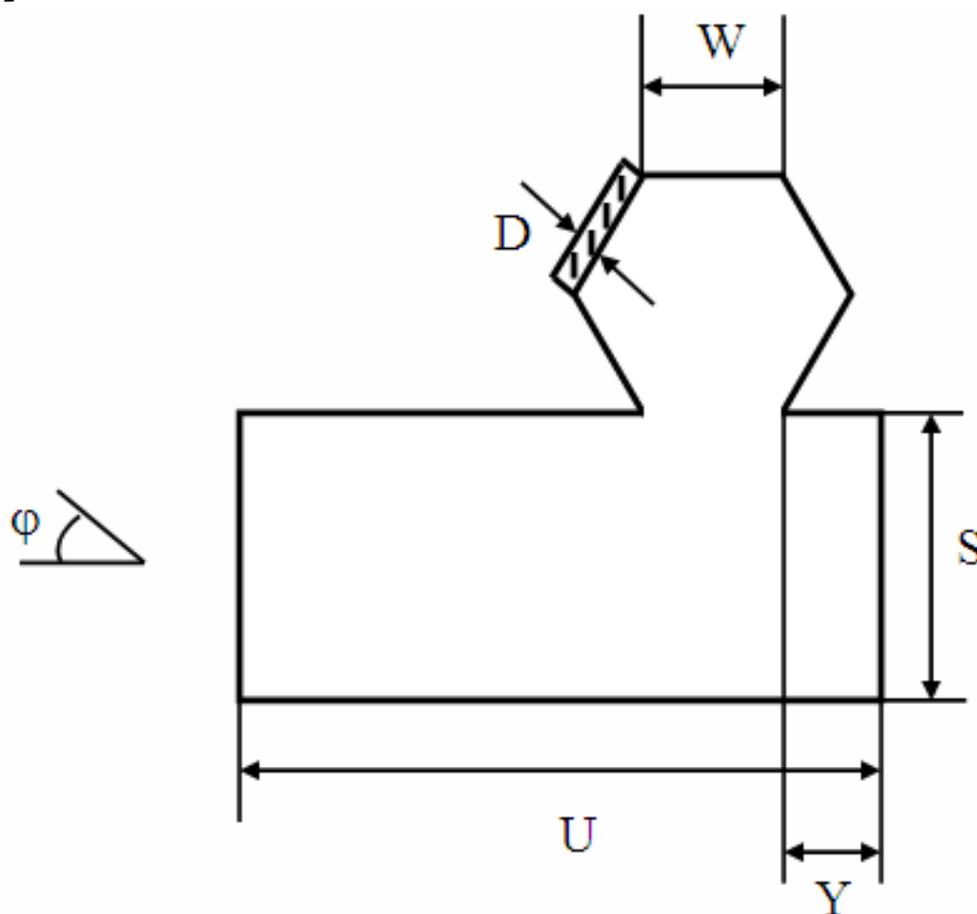


Рисунок 1 - Схема рассеяния электромагнитных волн на идеально проводящем объекте, имеющем сложную форму, с поглощающими компонентами

Рассеянные электромагнитные поля рассчитывались на базе метода интегральных уравнений. При учете поглощающей компоненты использовались импедансные граничные условия [8].

В таблице 1 приводятся значения коэффициентов аппроксимации  $\gamma_n$  по разным значениям размеров анализируемого объекта.

Считалось, что падающая электромагнитная волна наблюдается в секторе углов  $\phi \in [0, 37^\circ]$ .

**Результаты.** Была проведена аппроксимация характеристик

рассеяния [9, 10] в заданном секторе углов на основе алгебраического полинома

$$E_{\delta\delta\bar{n}} = \sum_n \gamma_n \cdot \varphi^n \quad (4)$$

Таблица 1- Значения аппроксимирующих коэффициентов

$\gamma_0$	0,145
$\gamma_1$	0,091
$\gamma_2$	0,042
$\gamma_3$	0,017
$\gamma_4$	0,012

а) Для значений размеров объекта:  $U=8\lambda$ ,  $Y=2\lambda$ ,  $S=4\lambda$ ,  $W=1.5\lambda$ ,  $D=0.05\lambda$ ,  $\varepsilon=5+j6$ .

$\gamma_0$	0,22
$\gamma_1$	0,13
$\gamma_2$	0,095
$\gamma_3$	0,042
$\gamma_4$	0,011

б) Для значений размеров объекта:  $U=9\lambda$ ,  $Y=1.8\lambda$ ,  $S=4\lambda$ ,  $W=1.5\lambda$ ,  $D=0.07\lambda$ ,  $\varepsilon=7+j3$ .

$\gamma_0$	0,33
$\gamma_1$	0,17
$\gamma_2$	0,024
$\gamma_3$	0,02
$\gamma_4$	0,003

в) Для значений размеров объекта:  $U=8.6\lambda$ ,  $Y=2.1\lambda$ ,  $S=4.2\lambda$ ,  $W=1.5\lambda$ ,  $D=0.08\lambda$ ,  $\varepsilon=9+j2$ .

$\gamma_0$	0,58
$\gamma_1$	0,18
$\gamma_2$	0,029
$\gamma_3$	0,015
$\gamma_4$	0,0067

г) Для значений размеров объекта:  $U=9.3\lambda$ ,  $Y=2.4\lambda$ ,  $S=4.5\lambda$ ,  $W=1.67\lambda$ ,  $D=0.09\lambda$ ,  $\varepsilon=3+j4$ .

С использованием прогнозируемых значений характеристик

рассеяния электромагнитных волн есть возможности для синтеза размеров рассматриваемого электродинамического объекта. Был разработан следующий алгоритм:

1. Задаются требуемые значения электромагнитных полей для фиксированных частот  $f_1, \dots, f_k$ .
2. Задаются границы изменения размеров объекта и параметров поглощающей компоненты.
3. Проводится прогнозирование значения электромагнитного поля для заданных частот.
4. Варьируются значения размеров объектов и параметров поглощающей компоненты.
5. Контроллируется разница между прогнозируемым значением электромагнитного поля и варьируемым.
6. Если разница меньше требуемого значения, то окончание работы алгоритма, иначе – возврат на шаг 4.

На Рисунке 2 приведена зависимость ошибки прогнозирования в зависимости от ширины полосы частот.

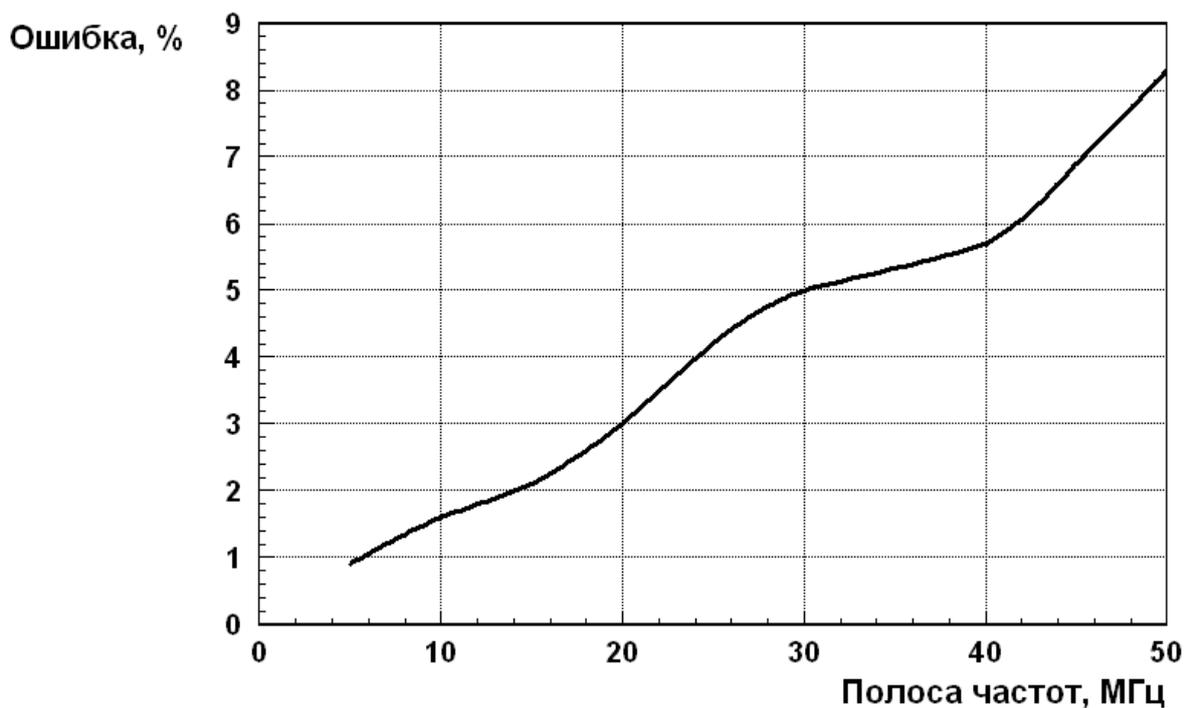


Рисунок 2 - Зависимость ошибки прогнозирования значений электромагнитного поля от полосы частот

**Выводы.** На базе математического моделирования с применением предложенного алгоритма была продемонстрирована и исследована возможность осуществления прогнозирования рассеивающих характеристик идеально проводящего объекта сложной формы с поглощающими компонентами в частотном диапазоне при различных их

размерах. Рассмотрены основные этапы алгоритма, в рамках которого проводится синтез параметров электродинамического объекта. Приведены значения коэффициентов аппроксимирующих полиномов для разных значений исследуемого объекта, содержащего на своей поверхности поглощающую компоненту.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Астанин Л.Ю., Костылев А.А. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. - М.: Радио и связь, 1989. - 190 с.
2. Зверев В.А. Радиооптика. - М.: Советское радио, 1975. - 304 с.
3. Преображенский А.П. Прогнозирование радиолокационных характеристик объектов с радиопоглощающими покрытиями в диапазоне длин волн / А.П. Преображенский // Телекоммуникации. 2003. № 4. С. 21-24.
4. Преображенский А.П. Методика прогнозирования радиолокационных характеристик объектов в диапазоне длин волн с использованием результатов измерения характеристик рассеяния на дискретных частотах / А.П. Преображенский, Чопоров О.Н. // Системы управления и информационные технологии. 2004. Т. 14. № 2. С. 98-101.
5. Преображенский А.П. Прогнозирование радиолокационных характеристик идеально проводящей полости в диапазоне длин волн / А.П. Преображенский // Телекоммуникации. 2005. № 12. С. 29-31.
6. Львович Я.Е. Решение задач оценки характеристик рассеяния электромагнитных волн на дифракционных структурах при их проектировании / Я.Е. Львович, И.Я. Львович, А.П. Преображенский // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2010. № 6. С. 255-256.
7. Косилов А.Т. Методы расчета радиолокационных характеристик объектов / А.Т. Косилов, А.П. Преображенский // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2005. Т. 1. № 8. С. 68-71.
8. Преображенский А.П. Импедансные граничные условия в задаче рассеяния электромагнитных волн на полости с радиопоглощающими покрытиями / А.П. Преображенский // Электромагнитные волны и электронные системы. 2006. Т. 11. № 2-3. С. 61-63.
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. 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.

A. A. Zhilina, V. N. Kostrova

**THE PREDICTING OF SCATTERING CHARACTERISTICS FOR  
METAL OBJECTS WITH ABSORBING COMPONENTS IN THE  
FREQUENCY RANGE**

*Russian new University, Moscow, Russia*

*Voronezh state technical University, Voronezh, Russia*

*The research urgency is caused by the fact that in the modern dynamic systems modeling and design, researchers do not always have information about its functioning in a given frequency range. This article discusses the technique of prediction of radar characteristics (RC), metal objects containing absorbing components in a certain frequency range, using the information on the scattering properties of the components of these objects. A leading approach to the study of this problem is the use of the apparatus of the green's function. Scattered electromagnetic field is calculated on the basis of the method of integral equations. When accounting for the absorbing components used impedance boundary conditions. Examples are given of prediction RC in the case where the object falls E-polarized plane electromagnetic wave. Was carried out approximation of the scattering parameters in a given sector of angles based on algebraic polynomial, given the coefficients of the polynomial. The algorithm was developed for the synthesis of the size of the object based on the data predict the levels of electromagnetic waves. Given the dependence of the prediction error values of the electromagnetic field of the frequency bands. The materials of the article are of practical value to professionals associated with the development of complex electrodynamic structures.*

**Keywords:** scattering of electromagnetic waves, predicting, acquisition, frequency analysis, synthesis.

**REFERENCES**

11. Astanin L.Yu., Kostylev A.A. Osnovy sverkhshirokopolosnykh radiolokatsionnykh izmereniy. - M.: Radio i svyaz', 1989. – p.190  
12. Zverev V.A. Radiooptika. - M.: Sovetskoe radio, 1975. – p.304.  
13. Preobrazhenskiy A.P. Prognozirovaniye radiolokatsionnykh kharakteristik ob"ektov s radiopogloshchayushchimi pokrytiyami v diapazone dlin voln / A.P. Preobrazhenskiy // Telekommunikatsii. 2003. No. 4. pp. 21-24.  
14. Preobrazhenskiy A.P. Metodika prognozirovaniya radiolokatsionnykh kharakteristik ob"ektov v diapazone dlin voln s ispol'zovaniem rezul'tatov izmereniya kharakteristik rasseyaniya na diskretnykh chastotakh / A.P. Preobrazhenskiy, Choporov O.N. // Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii. 2004. Vol. 14. No. 2. pp. 98-101.

15. Preobrazhenskiy A.P. Prognozirovanie radiolokatsionnykh kharakteristik ideal'no provodyashchey polosti v diapazone dlin voln / A.P. Preobrazhenskiy // Telekommunikatsii. 2005. Vol. 12. S. 29-31.
16. L'vovich Ya.E. Reshenie zadach otsenki kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnykh voln na difraktsionnykh strukturakh pri ikh proektirovanii / Ya.E. L'vovich, I.Ya.L'vovich, A.P.Preobrazhenskiy // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2010. Vol.6. pp. 255-256.
17. Kosilov A.T. Metody rascheta radiolokatsionnykh kharakteristik ob"ektov / A.T.Kosilov, A.P. Preobrazhenskiy // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2005. Vol. 1. No. 8. pp. 68-71.
18. Preobrazhenskiy A.P. Impedansnye granichnye usloviya v zadache rasseyaniya elektromagnitnykh voln na polosti s radiopogloshchayushchimi pokrytiyami / A.P. Preobrazhenskiy // Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy. 2006. Vol. 11. No. 2-3. pp. 61-63.
19. 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.
20. 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. Vol. 24. No. 2. pp. 96-98.