УДК 621.396

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-160-168

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ РАССЕЯНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОРМЫ ОБЪЕКТА ПО СТРУКТУРЕ ПОЛЯ ОТРАЖЕННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

А.И. КОЗЛОВ¹, В.Ю. МАСЛОВ²

¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

²Московский технологический университет, г. Москва, Россия

Для расчета отраженного поля от объекта его можно описывать совокупностью точечных отражателей, координаты которых в плоскости падения электромагнитной волны соответствовали узлам двумерной сетки с достаточно мелким шагом. При этом в расчетах отраженного поля используется модель однократного рассеяния, не учитывающая переотражение и взаимное влияние точечных элементов. Использован алгоритм быстрого прямого и обратного преобразования. Предлагаются алгоритмы численного решения прямой и обратной задачи рассеяния на объекте. Метод использует лучевые представления полей рассеяния, базирующиеся на принципе Гюйгенса – Френеля. Представлена графическая схема взаимного расположения объекта и плоскости наблюдения отраженного от объекта электромагнитного поля. Графически изображена двойная отражающая гауссова поверхность. Представлены рисунки модуля и аргумента комплексной амплитуды напряженности электрического поля отраженной волны от двойной гауссовой поверхности. Для нахождения формы поверхности неизвестного объекта используется алгоритм восстановления формы объекта по фазе отраженной волны, основанный на нахождении по аргументам комплексных элементов матрицы зависимости абсолютной фазы, которая пропорциональна расстоянию до соответствующей точки объекта.

Ключевые слова: обратная задача рассеяния, восстановление формы объекта, поляризация радиоволн, матрица рассеяния радиоволн.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших проблем радиолокации является решение задачи дистанционного определения рельефа местности¹ [1, 10, 10, 11], относящейся, как известно, к классу так называемых «вечных» задач. Ниже приводится принципиально новый подход к ее решению, опирающийся на некоторые идеализированные модели процессы рассеяния на негладкой поверхности. Тем не менее излагаемый подход можно рассматривать как первый шаг, дающий в дальнейшем усложнять модели.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ

Для расчета отраженного поля от объекта его можно описывать совокупностью точечных отражателей, координаты которых в плоскости падения электромагнитной волны соответствовали узлам двумерной сетки с достаточно мелким шагом. При этом в расчетах отраженного поля используется модель однократного рассеяния, не учитывающая переотражение и взаимное влияние точечных элементов. Значение диаграммы направленности каждого точечного элемента в направлении на антенну предполагалось равным косинусу угла

¹ Обнаружение, распознавание и определение параметров образов объектов / под ред. А.В. Коренного. М.: Радиотехника, 2012. 112 с.

между нормалью к локальной точке поверхности и этим направлением. Известно [1], что массив отражателей адекватно описывает сплошную поверхность, когда шаг сетки как минимум на порядок меньше длины волны зондирующего сигнала.

Пусть на неизвестный трехмерный объект с гладкой поверхностью падает плоская электромагнитная волна. Поверхность объекта имеет комплексную функцию рассеяния. Необходимо восстановить форму поверхности объекта по измерениям значения электромагнитного поля отраженной волны на расстоянии r от объекта.

Метод численного решения этой задачи использует лучевые представления полей рассеяния, базирующиеся на принципе Гюйгенса – Френеля. Метод включает в себя специально разработанные для данного случая алгоритмы быстрого численного прямого и обратного преобразования Гюйгенса – Френеля [2] и алгоритм восстановления формы неизвестного объекта по распределению фазы отраженной волны.

Используем разработанный в работах [2, 3] алгоритм быстрого численного прямого и обратного преобразования Гюйгенса – Френеля.

Если на поверхность объекта падает плоская электромагнитная волна, то в точке наблюдения (рис. 1) комплексная амплитуда напряженности электрического поля отраженной волны находится по формуле

$$e_{m,n} = \int_{D(x,y)} \underline{S}_{x,y} \frac{e^{ik\rho}}{\rho} dx dy, \quad (1)$$

где $\underline{S}_{x,y}$ – функция рассеяния объекта, ρ – расстояние между рассеивающей точкой на поверхности объекта и точкой, где определяется величина отраженного поля, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны, $D(x,y)$ – контур объекта. Начало координат совпадает с первыми элементами соответствующих двумерных массивов $\underline{S}_{x,y}$ и $e_{m,n}$.

Рис. 1. Схема взаимного расположения объекта и плоскости наблюдения отраженного от объекта электромагнитного поля

Fig. 1. The scheme of a relative positioning of an object and plane of the observation reflected from an object of the electromagnetic field

Поэтому если поверхность трехмерного объекта описывается уравнением $z = f_{x,y}$ и облучается плоской волной, нормаль к которой совпадает с осью z , то расстояние

$$\rho = \left[d^2 \left((x-m)^2 + (y-n)^2 \right) + (r + f_{x,y})^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

Точки, в которых задается функция рассеяния объекта, и точки, где определяются величины отраженного поля, располагаются в параллельных плоскостях на расстоянии d друг от друга. В области, в которой отраженные волны имеют сферический фронт, в множителе $1/\rho$ расстояние ρ полагается $\rho \approx r$, а расстояние ρ в показателе экспоненты можно представить в виде двух членов разложения в ряд Тейлора:

$$\rho \approx r + f_{x,y} + \frac{d^2 \left((x-m)^2 + (y-n)^2 \right) + f_{x,y}^2}{2r} = \rho_0 + \rho_f, \quad (3)$$

где $\rho_0 = r + \frac{d^2 \left((x-m)^2 + (y-n)^2 \right)}{2r}, \quad \rho_f = f_{x,y} + \frac{f_{x,y}^2}{2r}.$

С учетом сделанных предположений комплексная амплитуда вектора напряженности электрического поля отраженной волны определяется как

$$e_{m,n} = \sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^N \underline{S}_{x,y} \frac{e^{ik\rho}}{r} = \sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^N \underline{S}_{x,y} \frac{e^{ik(\rho_0 + \rho_f)}}{r}, \quad (4)$$

$$e_{m,n} = \sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^N \frac{e^{ik\rho_0}}{r} \underline{S}_{x,y} \frac{e^{ik\rho_f}}{r}, \quad (5)$$

где размерность двумерных массивов $\underline{S}_{x,y}$ и $e_{m,n}$ равно произведению $N \times N$.

Выражение (5) можно представить в виде произведения матриц

$$\mathbf{G} = \mathbf{\Phi} \mathbf{P}. \quad (6)$$

При этом двумерный массив $\underline{p}_{x,y} = \underline{S}_{x,y} e^{ik \left(f_{x,y} + \frac{f_{x,y}^2}{2r} \right)}$ в уравнении (6) преобразуется в матрицу $\mathbf{P}$ размером $N^2 \times 1$

$$\mathbf{P} = \left(\underline{p}_{1,1} \quad \underline{p}_{1,2} \quad \cdots \quad \underline{p}_{1,N} \quad \underline{p}_{2,1} \quad \underline{p}_{2,2} \quad \cdots \quad \underline{p}_{N,N} \right)^T \frac{1}{r}. \quad (7)$$

Матрица $\mathbf{\Phi}$ размером $N^2 \times N^2$ имеет элементы

$$\underline{\phi}_{m,n}^{x,y} = e^{ikd^2 \left((x-m)^2 + (y-n)^2 \right) \frac{1}{2r}}. \quad (8)$$

Матрица Φ зависит только от двух величин r и d , определяющих взаимное положение объекта и точек наблюдения отраженного поля. Поэтому при неизменных величинах r и d требуется лишь однократный расчет этой матрицы. Этим достигается высокое быстродействие предложенного алгоритма прямого преобразования Гюйгенса – Френеля [2, 6, 12].

Полученную в результате расчета по формуле (6) матрицу G размером $N^2 \times 1$

$$G = (\underline{e}_{1,1} \quad \underline{e}_{1,2} \quad L \quad \underline{e}_{1,N} \quad \underline{e}_{2,1} \quad \underline{e}_{2,2} \quad L \quad \underline{e}_{N,N})^T \quad (9)$$

следует затем преобразовать в двумерную матрицу размером $N \times N$

$$G_0 = \begin{pmatrix} \underline{e}_{1,1} & L & \underline{e}_{1,N} \\ M & & M \\ \underline{e}_{N,1} & L & \underline{e}_{N,N} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

На рис. 2 в качестве отражающего объекта изображена двойная гауссова поверхность с постоянной функцией рассеяния $\underline{S}_{x,y}$.

Рис. 2. Двойная отражающая гауссова поверхность ($N = 40$)
Fig. 2. The double reflecting Gaussian surface ($N = 40$)

Результаты расчета по формуле (6) модуля и аргумента комплексной амплитуды напряженности электрического поля отраженной волны $\underline{e}_{m,n}$ на расстоянии r от двойной отражающей гауссовой поверхности представлены соответственно на рис. 3 и 4.

Для получения радиоизображения исследуемого объекта зарегистрированные значения комплексной амплитуды напряженности электрического поля отраженной волны $\underline{e}_{m,n}$ должны быть подвергнуты процедуре восстановления.

Рис. 3. Массив значений модуля комплексной амплитуды напряженности электрического поля отраженной волны $\underline{e}_{m,n}$ от двойной гауссовой поверхности

Fig. 3. Array of values of the module of complex amplitude of strength of electrical fields of the reflected mode $\underline{e}_{m,n}$ from a double Gaussian surface

Рис. 4. Массив значений аргумента комплексной амплитуды напряженности электрического поля отраженной волны $\underline{e}_{m,n}$ от двойной гауссовой поверхности

Fig. 4. Array of argument values of complex amplitude of strength of electric field of the reflected mode $\underline{e}_{m,n}$ from a double Gaussian surface

Алгоритм обратного преобразования Гюйгенса – Френеля заключается в нахождении матрицы $\mathbf{P}$ размером $N^2 \times 1$, элементы которой характеризуются функцией рассеяния объекта $\underline{S}_{x,y}^{2,3}$ [4, 5]. Эта задача сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений вида

$$\Phi \mathbf{P} = \mathbf{G}. \quad (11)$$

В уравнении (11) матрица Φ определяется из соотношения (8) при заданных геометрических величинах r и d , определяющих взаимное положение объекта и точек наблюдения отраженного поля. Матрица $\mathbf{G}$ размером $N^2 \times 1$ образуется из массива комплексных значений отраженного поля $\underline{e}_{m,n}$ (9). Для решения системы (11) можно использовать, например, алгоритм LU -разложения. При постоянных величинах r и d , определяющих взаимное положение объекта и точек наблюдения отраженного поля, требуется однократное нахождение разложения матрицы

$$\Phi = \mathbf{L}\mathbf{U}, \quad (12)$$

где $\mathbf{L}$ – нижняя треугольная, а $\mathbf{U}$ – верхняя треугольная матрицы. Этим обстоятельством определяется высокое быстродействие предложенного алгоритма обратного преобразования Гюйгенса – Френеля.

После нахождения искомой матрицы $\mathbf{P}$ ее надо преобразовать в квадратную матрицу $\mathbf{P}_0$ размером $N \times N$. На рис. 5 и 6 представлены соответственно массивы модуля и аргумента комплексных элементов матрицы $\mathbf{P}_0$.

Для нахождения формы поверхности неизвестного объекта используется алгоритм восстановления формы объекта по фазе отраженной волны [3], основанный на нахождении по аргументам комплексных элементов матрицы $\mathbf{P}_0$ зависимости абсолютной фазы, которая пропорциональна расстоянию до соответствующей точки объекта $k\rho_{m,n}$ ($k = 2\pi/\lambda$).

² Справочник по радиолокации. В 2-х кн. / под ред. М. Сколник. М.: Техносфера, 2014. 680 с.

³ Справочник. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория / под ред. Я.Д. Ширман. М.: Радиотехника, 2007. 515 с.

Рис. 5. Массив значений модулей комплексных элементов матрицы P_0 объекта
Fig. 5. Array of modules values of complex elements of a matrix P_0 of an object

Рис. 6. Массив значений аргументов комплексных элементов матрицы P_0 объекта
Fig. 6. Array of argument values of complex elements of a matrix P_0 of an object

На рис. 7 приводится восстановленная форма поверхности объекта по аргументам комплексных элементов матрицы P_0 обратного преобразования Гюйгенса – Френеля.

Рис. 7. Восстановленная форма объекта
Fig. 7. Restored object shape

Рассмотренный подход к решению задачи дистанционного определения рельефа местности и ее строгое решение, опирающееся на идеализированные модели рассеяния, дает возможность перейти к следующему шагу в уточнении построенного рельефа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А. Поляризация радиоволн. Кн. 2. Радиолокационная поляриметрия. М.: Радиотехника, 2007. 644 с.
2. Козлов А.И., Маслов В.Ю. Численный метод решения трехмерной обратной задачи рассеяния электромагнитных волн на препятствии // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 179. С. 135–139.

3. Козлов А.И., Маслов В.Ю. Восстановление формы поверхности объекта по поляризационной структуре поля отраженной волны // Научный Вестник МГТУ ГА. 2016. Т. 19, № 5. С. 45–53.
4. Козлов А.И., Маслов В.Ю. Численный метод определения неоднородной комплексной диэлектрической проницаемости плоской поверхности объектов по поляризационной структуре поля отраженной электромагнитной волны // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 179. С. 140–144.
5. Козлов А.И., Маслов В.Ю. Дистанционное определение диэлектрической проницаемости поверхности в оптическом диапазоне // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 210(12). С. 40–42.
6. Козлов А.И., Маслов В.Ю. Дифференциальные уравнения эволюции матрицы рассеяния // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 210(12). С. 43–46.
7. Богородский В.В., Канарейкин Д.Б., Козлов А.И. Поляризация рассеянного и собственного радиоизлучения земных покровов. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 279 с.
8. Богородский В.В., Козлов А.И. Микроволновая радиометрия земных покровов. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 272 с.
9. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
10. Островитянов Р.В., Басалов Ф.А. Статистическая теория радиолокации протяженных целей. М.: Радио и связь, 1982. 232 с.
11. Верба В.С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования. М.: Радиотехника, 2014. 525 с.
12. Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ. М.: Мир, 1989. 655 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Козлов Анатолий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта Московского государственного технического университета гражданской авиации, vilandes@yandex.ru.

Маслов Виктор Юрьевич, доктор технических наук, профессор, профессор Московского технологического университета, vilandes@yandex.ru.

THE INVERSE-SCATTERING PROBLEM SOLUTION AND SHAPE FROM THE REFLECTED ELECTROMAGNETIC WAVE FIELD STRUCTURE

Anatoliy I. Kozlov¹, Viktor Yu. Maslov²

¹Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

²Moscow Technological University, Moscow, Russia

ABSTRACT

The reflected field calculation from the object can be described with the set of point reflectors with the coordinates in electromagnetic wave plane of incidence corresponding to two-dimensional grid nodes with rather small-sized step. At the same time, the single scattering model which does not consider the re-reflection and point elements cross impact is used in the reflected field calculations. The rapid direct and inverse transformation algorithm is used. The numerical solution

algorithms of the direct and inverse scattering problems on the object are offered. The method uses the ray representations scattering fields which are based on the Huygens-Fresnel principle. The graphic diagram of the reciprocal object positioning and the observation plane from the reflected electromagnetic field object is represented. The double reflecting Gaussian surface is graphically figured. The figures of the module and the complex amplitude electric field strength of the reflected wave from a double Gaussian surface argument are provided. To shape the surface of the unknown object the recovery shape algorithm is used, by means of reflected wave phase. This algorithm is based on finding the complex matrix elements in dependence on absolute phase, which is proportional to the appropriate point object distance.

Key words: inverse scattering problem, the recovery of the object shape, the radio waves polarization, radio waves scattering matrix.

REFERENCES

1. Kozlov, A.I., Logvin, A.I. and Sarychev, V.A. (2007). *Polyarizaciya radiovoln. Kn. 2. Radiolokacionnaya polarimetriya* [Polarization of radio waves. Book 2. Radar polarimetry]. Moscow: Radio engineering, 644 p. (in Russian)
2. Kozlov, A.I. and Maslov, V.Yu. (2012). *Chislennyj metod reshenija trehmernoj obratnoj zadachi rassejanija jelektromagnitnyh voln na prepjatstvii* [Numerical method of the decision of a three-dimensional inverse problem of dissipation of the electromagnetic waves on obstacle]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 179, pp. 135–139. (in Russian)
3. Kozlov, A.I. and Maslov, V.Yu. (2016). *Vosstanovlenie formy poverhnosti ob'ekta po poljarizacionnoj strukture polja otrazhennoj volny* [Shape restoration of object surface on polarization structure of reflected electromagnetic wave field]. Civil Aviation High Technologies, vol. 19, no. 5, pp. 45–53. (in Russian)
4. Kozlov, A.I. and Maslov, V.Yu. (2012). *Chislennyj metod opredelenija neodnorodnoj kompleksnoj dijelektricheskoj pronicaemosti ploskoj poverhnosti ob'ektov po poljarizacionnoj strukture polja otrazhennoj jelektromagnitnoj volny* [Numerical method of the determination complex permeability to flat surface object on polarization structure of the field of the reflected electromagnetic wave]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 179, pp. 140–144. (in Russian)
5. Kozlov, A.I. and Maslov, V.Yu. (2014). *Distancionnoe opredelenie dijelektricheskoj pronicaemosti poverhnosti v opticheskom diapazone* [Remote sensing of dielectric permeability of surface in optical range]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 12(210), pp. 40–42. (in Russian)
6. Kozlov, A.I. and Maslov, V.Yu. (2014). *Differencial'nye uravnenija jevoljucii matricy rassejanija* [Differential equations to evolutions of scattering matrix]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 1(210), pp. 43–46. (in Russian)
7. Bogorodskii, V.V., Kanareykin, D.B. and Kozlov, A.I. (1981). *Poljarizacija rassejannogo i sobstvennogo radioizluchenija zemnyh pokrovov* [Polarization of scattered and own radio emission of terrestrial covers]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 280 p. (in Russian)
8. Bogorodskii, V.V. and Kozlov, A.I. (1985). *Mikrovolnovaja radiometrija zemnyh pokrovov* [Microwave radiometry of terrestrial covers]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 260 p. (in Russian)
9. Kondratenkov, G.S. and Frolov, A.Ju. (). *Radiolokacionnye sistemi distancionnogo zondirovanija Zemli* [Radio-wave imaging. Radar systems of Earth's remote sensing]. Moscow: Radio Engineering, 2005, 368 p. (in Russian)
10. Ostrovitjanov, R.V. and Basalov, F.A. (1982). *Statisticheskaja teorija radiolokacii pronjaczennich celej* [Statistical theory of extended radar targets]. Moscow: Radio i svjaz [Radio and Communication], 232 p. (in Russian)

11. Verba, V.S. (2014). *Aviacionnije kompleksi radiolokacionnogo dozora i navedenija* [Aviation complexes of radar patrol and guidance. Principles of design, problems of development and maintenance features]. Moscow: Radio Engineering, 525 p. (in Russian)

12. Horn, R. and Johnson, C. (1989). *Matrichnyj analiz* [Matrix analysis]. Moscow: Mir, 655 p. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anatoliy I. Kozlov, Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Chair of Technical Maintenance of Radio Electronic Equipment for Air Transport of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, vilandes@yandex.ru.

Viktor Yu. Maslov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Moscow Technological University, vilandes@yandex.ru.

Поступила в редакцию 12.09.2017
Принята в печать 15.05.2018

Received 12.09.2017
Accepted for publication 15.05.2018