

УДК 621.396.96:535

## МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛОКАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ РАССЕЯНИЯ ОБЪЕКТА ПО ДИАГРАММЕ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

С. Н. Кутищев

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, г. Воронеж, Россия

Предложен метод восстановления по диаграмме обратного рассеяния количества, амплитуд и координат изотропных жёстко связанных и электродинамически независимых локальных источников рассеяния объекта. Представлены результаты численного восстановления параметров трёх отражателей, подтверждающие работоспособность предложенного метода, указаны ограничения и возможности его дальнейшего развития.

В настоящее время ведётся активный поиск методов восстановления структуры рассеивающих объектов по рассеянному полю в радиолокации [1–6], теории антенн [7], радиоастрономии [8], оптике [9] и других областях науки. Актуальность таких работ в радиолокации обусловлена, например, необходимостью иметь достаточно полную информацию о пространственной структуре локальных источников [10] рассеяния на поверхности объектов сложной формы. Полученные в рамках таких исследований результаты могут быть использованы для совершенствования средств и способов уменьшения радиолокационной заметности объектов.

В полигонных и лабораторных условиях диаграммы обратного рассеяния объектов строятся в результате их вращения. Затем возникает проблема восстановления по этим диаграммам характеристик локальных источников рассеяния объектов. Цель данной работы — разработка метода восстановления количества, амплитуд и координат локальных источников рассеяния объекта по его диаграмме обратного рассеяния.

Рассмотрим случай моностатического рассеяния плоской электромагнитной волны системой  $N$  изотропных жёстко связанных и электродинамически независимых отражателей (рис. 1), представляющей собой электродинамическую модель [11] объекта. При приёме узкополосного ( $\Delta f/f \ll 1$ , где  $f$  — несущая частота) отражённого сигнала в дальней зоне объекта и приёмопередающей антенны диаграмму обратного рассеяния с учётом результатов работы [2] и геометрии задачи (считая, что измерения проводятся в плоскости  $xy$ ) можно представить следующим образом:

$$E^{(0)}(\varphi) = \sum_{i=1}^N E_i \exp[j 2k (x_i \cos \varphi + y_i \sin \varphi)], \quad (1)$$

где  $x_m, y_m$  — координаты  $m$ -го отражателя;  $E_m$  — амплитуда сигнала, рассеянного  $m$ -м отражателем;  $\varphi$  — угол наблюдения, отсчитываемый от оси  $x$ , направленной вдоль биссектрисы сектора углов  $\Delta\varphi$ ;  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число;  $\lambda$  — длина волны. Формула (1) справедлива для любых углов наблюдения  $\varphi$ .

Когда  $\Delta\varphi/2 \ll 1$ , выражение (1) может быть линеаризовано и преобразовано к следующему виду:

$$E^{(0)}(u) = \sum_{i=1}^N \tilde{E}_i \exp(j 2y_i u), \quad |u| \leq k \sin(\Delta\varphi/2) \ll k, \quad (2)$$

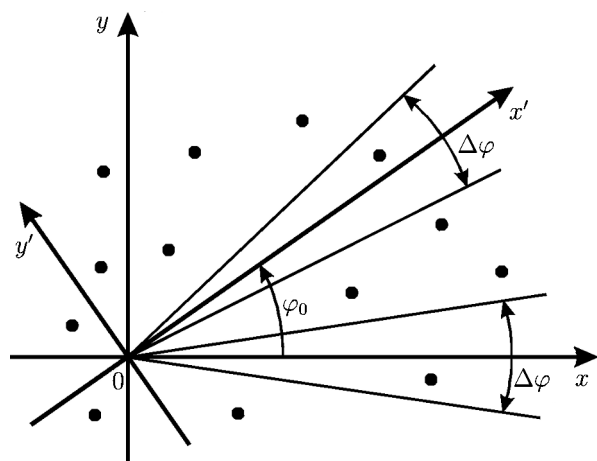


Рис. 1. Модель объекта

координаты  $y_i$  и амплитуды их полей рассеяния  $E_i$ . А именно, по фрагменту известной из измерений диаграммы обратного рассеяния (1) объекта определяется спектр пространственных частот  $E(u, \Delta\varphi)$ :

$$E(u, \Delta\varphi) = \begin{cases} E^{(0)}(u), & |u| \leq k \sin(\Delta\varphi/2) \ll k; \\ 0, & |u| > k \sin(\Delta\varphi/2). \end{cases} \quad (3)$$

При записи спектра пространственных частот  $E(u, \Delta\varphi)$  в (3) использовано прямоугольное окно [12], правомерность применения которого связана с малостью сектора углов наблюдения  $\Delta\varphi$ .

По спектру пространственных частот  $E(u, \Delta\varphi)$  находится одномерное радиолокационное изображение  $J(y, \Delta\varphi)$  объекта [3–6, 13]:

$$J(y, \Delta\varphi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} E(u, \Delta\varphi) \exp(-jyu) du = \frac{k \Delta\varphi}{2\pi} \sum_{i=1}^N \tilde{E}_i \frac{\sin[(k \Delta\varphi/2)(y - 2y_i)]}{(k \Delta\varphi/2)(y - 2y_i)}. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что количество главных максимумов совпадает с числом локальных источников рассеяния  $N$ . Поперечные координаты последних равны половине поперечных координат соответствующих главных максимумов. Величины главных максимумов одномерного радиолокационного изображения  $J(y, \Delta\varphi)$  (4) соответствуют амплитудам  $E_i$  полей рассеяния локальных источников рассеяния объекта.

Этап 2. По фрагменту  $E^{(0)}(\varphi)$ , известному при  $|\varphi - \varphi_0| \leq \Delta\varphi/2 \ll 1$ , с помощью алгоритма этапа 1 находятся поперечные координаты  $y'_i$  локальных источников рассеяния в системе координат  $x'y'$ , повернутой на угол  $\varphi_0$  относительно системы координат  $xy$  (рис. 1).

Рассмотрим диаграмму обратного рассеяния  $E^{(0)}(\varphi)$  в секторе углов наблюдения  $|\varphi - \varphi_0| \leq \Delta\varphi/2 \ll 1$  (рис. 1). Используя известные соотношения [14] для преобразования координат локальных источников рассеяния, запишем её в системе координат  $x'y'$  следующим образом [4]:

$$E^{(0)}(\varphi) = \sum_{i=1}^N E_i \exp\{j 2k [x'_i \cos(\varphi - \varphi_0) + y'_i \sin(\varphi - \varphi_0)]\}. \quad (5)$$

При этом угол поворота  $\varphi_0$  может принимать любые значения.

Из сравнения (1) и (5) следует, что алгоритм нахождения поперечных координат  $y'_i$  этапа 2 аналогичен алгоритму расчёта поперечных координат  $y_i$  этапа 1.

где  $\tilde{E}_n = E_n \exp(j 2kx_n)$ ,  $u = k \sin(\varphi)$  — пространственная частота.

Таким образом, рассматриваемую задачу можно сформулировать в следующем виде: для рассматриваемой модели объекта необходимо найти количество локальных источников рассеяния  $N$ , амплитуды их полей рассеяния  $E_i$  и их поперечные и продольные координаты  $y_i$  и  $x_i$  по известной из эксперимента диаграмме обратного рассеяния  $|E^{(0)}(u)|$ , где  $|u| \leq k \sin(\Delta\varphi/2) \ll k$ .

Предлагаемый метод решения данной задачи состоит из следующих этапов.

Этап 1. По фрагменту  $E^{(0)}(\varphi)$ , известному при  $|\varphi| \leq \Delta\varphi/2 \ll 1$ , находятся количество локальных источников рассеяния  $N$ , их поперечные

Таблица 1. Параметры локальных источников рассеяния

$i$	$x$	$x_{\text{в}}$	$y$	$y_{\text{в}}$	$E$	$E_{\text{в}}$
1	$0\lambda$	$0,10\lambda$	$0\lambda$	$0,20\lambda$	5	4,41
2	$30,40\lambda$	$30,40\lambda$	$20,10\lambda$	$20,20\lambda$	16	12,64
3	$10,20\lambda$	$10,20\lambda$	$30,20\lambda$	$30,30\lambda$	10	10,47

Примечание. Здесь индекс «в» обозначает восстановленные величины.

По найденным поперечным координатам локальных источников рассеяния  $y_i$ ,  $y'_i$  их продольные координаты  $x_i$  (рис. 1) вычисляются с помощью уравнений [4]:

$$x_i = y_i \operatorname{ctg} \varphi_0 - y'_i / (\sin \varphi_0). \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что с увеличением угла поворота  $\varphi_0$  ошибка определения продольных координат локальных источников рассеяния уменьшается. Для  $\varphi_0 = 90^\circ$  имеем

$$x_i = -y'_i. \quad (7)$$

В этом случае ошибка восстановления продольных координат в системе  $xy$  совпадает с ошибкой восстановления поперечных координат в системе  $x'y'$ . Таким образом, на этапе 2 целесообразно выбирать угол поворота  $\varphi_0 = 90^\circ$ .

Проиллюстрируем решение рассматриваемой задачи с помощью разработанного алгоритма на примере объекта в виде трёх локальных источников рассеяния с координатами  $x_i$ ,  $y_i$  и амплитудами полей рассеяния  $E_i$  (см. табл. 1).

На рис. 2 показан фрагмент амплитудной диаграммы обратного рассеяния  $|E(u)|$  системы из трёх рассеивающих центров для пространственных частот  $u \in [k \sin(-6^\circ); k \sin(6^\circ)]$  ( $\Delta\varphi = 12^\circ$ ).

На рис. 3 изображён фрагмент фазовой диаграммы обратного рассеяния  $\arg(u)$  (отметим, что  $E(u) = |E(u)| \exp[j \arg(u)]$ ) для той же системы и для тех же пространственных частот.

На рис. 4 показан модуль одномерного изображения трёх рассеивающих центров  $|J|$  (4) для  $u \in [k \sin(-6^\circ); k \sin(6^\circ)]$ . Три главных максимума  $|J|$  соответствуют трём локальным источникам рассеяния. Их поперечные координаты  $y_{\text{в}}$  (см. табл. 1) равны половинам поперечных координат соответствующих главных максимумов. Величины главных максимумов одномерного изображения  $J(y, \Delta\varphi)$  соответствуют амплитудам  $E_{\text{в}}$  (см. табл. 1).

На рис. 5 представлен модуль одномерного изображения трёх рассеивающих центров  $|J|$  для  $u \in [k \sin(84^\circ); k \sin(96^\circ)]$  ( $\varphi_0 = 90^\circ$ ). Их продольные координаты  $x_{\text{в}}$  (см. табл. 1) равны взятым со знаком минус половинам поперечных координат соответствующих главных максимумов в системе  $x'y'$ , см. (4), (7).

Отметим, что при угле визирования  $\varphi_0 = 0^\circ$  локальные источники рассеяния могут быть однозначно пронумерованы (см. этап 1). Правило их идентификации для других углов визирования  $\varphi_0$ , исключающее возможность их «перепутывания», состоит в следующем. Для случая различных амплитуд их полей рассеяния для их правильной идентификации используются эти амплитуды. В случае одинаковых амплитуд полей рассеяния всех локальных источников рассеяния или совпадения отдельных амплитуд сначала осуществляется оценка продольных координат локальных источников рассеяния (этап 2, формула (6)) для небольшого угла визирования  $\varphi_0$ , примерно равного нескольким градусам, при котором сохраняется исходный порядок их расположения. Это возможно, поскольку разработанный метод предполагает разнесение локальных источников рассеяния в поперечном и продольном направлениях на расстояния, превышающие

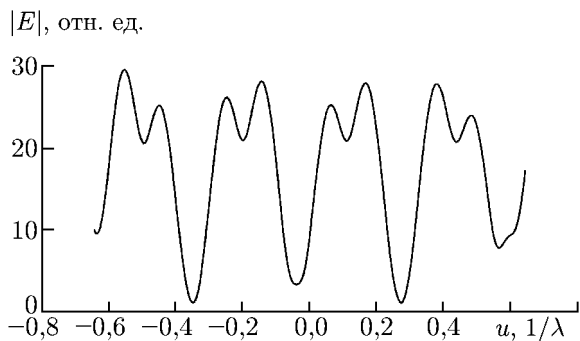


Рис. 2. Амплитудная диаграмма обратного рассеяния системы из трёх рассеивающих центров для пространственных частот  $u \in [k \sin(-6^\circ); k \sin(6^\circ)]$  ( $\Delta\varphi = 12^\circ$ )

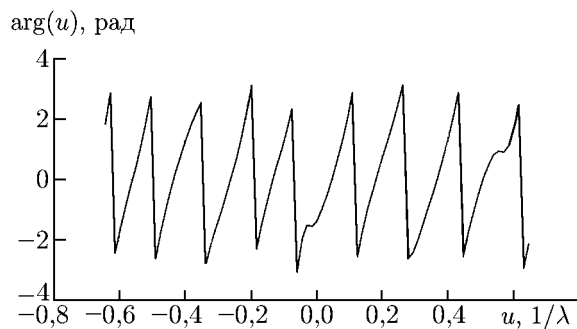


Рис. 3. Фазовая диаграмма обратного рассеяния той же системы и для тех же пространственных частот, что и на рис. 2

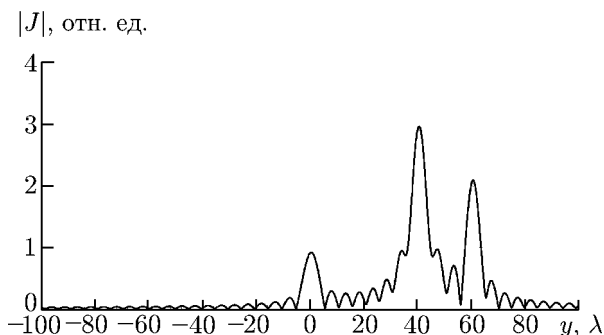


Рис. 4. Модуль одномерного изображения  $J$  трёх рассеивающих центров для  $u \in [k \sin(-6^\circ); k \sin(6^\circ)]$

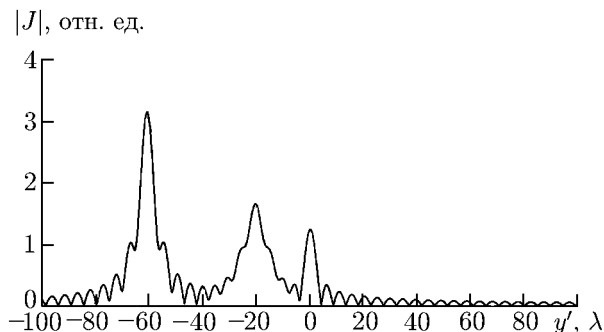


Рис. 5. Модуль одномерного изображения  $J$  трёх рассеивающих центров для  $u \in [k \sin(84^\circ); k \sin(96^\circ)]$  ( $\varphi_0 = 90^\circ$ )

разрешающую способность аппаратуры  $\delta = \lambda / (2 \Delta\varphi)$ . Далее, для угла визирования  $\varphi_0 = 90^\circ$  рассеивающие центры идентифицируются с помощью сравнения соответствующих восстановленных (см. этап 2, формула (7)) и оценочных их продольных координат.

В рассмотренном примере амплитуды полей рассеяния локальных источников рассеяния различны. При угле визирования  $\varphi_0 = 0^\circ$  максимумы модуля одномерного изображения располагаются в последовательности 1, 2, 3 (см. рис. 4). Согласно правилу их идентификации при угле визирования  $\varphi_0 = 90^\circ$  максимумы модуля одномерного изображения будут располагаться в последовательности 2, 3, 1 (см. рис. 5).

В результате численных расчётов установлено, что для правомерности линейаризации формулы (1) к виду (2) максимальный размер объекта не должен превышать примерно  $50\lambda$ .

Анализ численных результатов (см. табл. 1) позволяет сделать вывод, что в рассмотренном примере абсолютная ошибка восстановления поперечных координат локальных источников рассеяния  $\Delta y \approx 0,2\lambda$ , а абсолютная ошибка восстановления их продольных координат  $\Delta x \approx 0,1\lambda$ . Относительная ошибка восстановления амплитуд полей рассеяния рассеивающих центров составила примерно 21%.

Таким образом, разработанный метод позволяет восстанавливать по диаграмме обратного рассеяния количество, амплитуды полей рассеяния и координаты изотропных жёстко связанных и электродинамически независимых локальных источников рассеяния объекта. При этом

необходимо выполнение следующих условий: амплитуды полей рассеяния должны быть одного порядка, в поперечном и продольном направлениях локальные источники рассеяния должны быть разнесены на расстояния, большие разрешающей способности аппаратуры  $\delta = \lambda/(2 \Delta\varphi)$ , а максимальный размер объекта не должен превышать примерно  $50\lambda$ .

В дальнейшем планируется применить предложенный метод для восстановления параметров локальных источников рассеяния цилиндрических объектов и полостей сложной формы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лучин А. А. // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1999. № 8. С. 30.
2. Гатилова И. Ю., Понькин В. А., Ужахов Т. С. // Радиотехника. 2000. № 6. С. 79.
3. Кутищев С. Н. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. Т. 12, № 6. С. 23.
4. Кутищев С. Н. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2009. Т. 14, № 2. С. 66.
5. Кутищев С. Н. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2009. Т. 14, № 3. С. 68.
6. Кутищев С. Н. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2009. Т. 14, № 6. С. 42.
7. Конюков М. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1983. Т. 26, № 11. С. 1437.
8. Аблеков В. К., Зубков П. И., Фролов А. В. Оптическая и оптоэлектронная обработка информации. М.: Машиностроение, 1976.
9. Обратные задачи в оптике / Под ред. Г. П. Болтса. М.: Машиностроение, 1984.
10. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов / Под ред. Л. Т. Тучкова. М.: Радио и связь, 1985.
11. Штагер Е. А., Чаевский Е. В. Рассеяние волн на телах сложной формы. М.: Сов. радио, 1974.
12. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978.
13. Бакут П. А., Ряхин А. Д., Свиридов К. Н., Устинов Н. Д. // Оптика и спектроскопия. 1985. Т. 58, вып. 4. С. 905.
14. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / Под ред. Г. Гроше, В. Циглера. М.: Наука, 1980.

Поступила в редакцию 3 октября 2011 г.; принята в печать 28 декабря 2011 г.

### A METHOD FOR RECONSTRUCTION OF THE PARAMETERS OF LOCAL OBJECT-SCATTERING SOURCES BASING ON THE BACKSCATTERING DIAGRAM

*S. N. Kutischev*

We propose a method to reconstruct the number, amplitudes and coordinates of isotropic, rigidly bound, and electrostatically independent local sources of object scattering on the basis of the backscattering diagram. The results of reconstructing numerically the parameters of three reflectors are presented, which confirm the feasibility of the proposed method. The limitations and further development potential of the method are indicated.