

ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ФІЗИЧНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

УДК 537.87 : 621.396.96

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБЪЕКТА В ОКРЕСТНОСТИ "БЛЕСТЯЩЕЙ" ТОЧКИ

В.Б. Бзот, А.В. Музыченко, О.И. Сухаревский
(Объединенный научно-исследовательский институт Вооруженных Сил, Харьков)

Предлагается алгоритм определения геометрии поверхности гладкого выпуклого идеально проводящего рассеивателя вблизи точки зеркального отражения.

радиолокационное распознавание, радиолокационная цель, «блестящая» точка, идеально проводящий рассеиватель

Постановка проблемы. Одним из требований, предъявляемых к современному и перспективному радиолокационным системам, как военного, так и гражданского назначения, является проведение распознавания обнаруженного радиолокационного объекта (РЛО). Решение этой задачи стало возможным благодаря развитию технических средств получения информации о РЛО и теории ее обработки, что позволило проводить измерение некоординатных параметров радиолокационных целей (РЛЦ). Для распознавания используют определенные измеренные признаки цели, которые сопоставляют в соответствии с алгоритмами распознавания с известными (эталонными) признаками.

Очевидно, к одним из наиболее информативных признаков распознавания можно отнести геометрические характеристики распознаваемого объекта. Однако использование таких характеристик осложняется трудностями, вызванными сложностью их определения по результатам радиолокационного зондирования.

Один из основных классов объектов радиолокации традиционно составляют воздушные РЛО. Развитие современной радиолокации привело к появлению возможности разрешения отдельных элементов конструк-

ции таких объектов. Это, в свою очередь, позволяет обрабатывать отклики отдельных элементов независимо друг от друга с последующим объединением информации для получения целостной картины. Определив геометрию цели в окрестности центра каждого разрешаемого элемента и объединив полученную информацию, можно составить форму всей поверхности РЛЦ, либо какой-то ее части. В связи с этим интерес представляет решение задачи определения геометрических параметров РЛО простой формы как составная часть алгоритма распознавания воздушных объектов, имеющих сложную геометрическую форму поверхности.

Анализ последних достижений и публикаций. Разработке методов определения геометрических характеристик РЛО посвящается значительное число работ (например, [1 – 5]).

В частности, в статье [5] содержится обзор методов решения указанной задачи и анализ современного состояния проблемы. Автор указывает, что строго математически такая задача формулируется как граничная задача Дирихле (или Неймана), решение которой для тел сложной формы требует применения численных методов. Из-за вычислительных сложностей такой подход оказывается практически реализуемым лишь при небольшом отношении размеров тела к длине волны. Для электрически больших рассеивателей находят применение приближенные методы. Данные методы опираются на ту или иную приближенную теорию описания процесса рассеяния ЭМВ, в частности на геометрическую оптику (ГО) и ФО. Соответствующим образом автор классифицирует и результаты решения обратной задачи, поскольку потенциальная точность ее решения ограничивается погрешностями, возникающими из-за нарушения предположений, положенных в основу принятого описания процесса рассеяния. Общим недостатком методов, развиваемых в указанных работах является необходимость наличия подробной информации о рассеянном объектом поле в широких диапазонах частот и углов зондирования.

Более предпочтительным в этом отношении выглядит алгоритм восстановления "освещенной" части гладкой выпуклой идеально проводящей поверхности больших электрических размеров, находящейся в свободном пространстве [6]. Алгоритм предусматривает наличие информации о характеристиках рассеяния объекта (в частности, его переходной характеристике (ПХ)) для одного ракурса зондирования. Данный алгоритм основан на известной [7] связи высокочастотной аппроксимации ПХ объекта с его геометрией. Он заключается в последовательном продвижении во времени со сравнением на каждом шаге расчетных значений ПХ со значениями ПХ, полученными по результатам измерения. На основе невязки между этими значениями производится уточнение восстанавливаемой формы объекта. Существенным этапом алгоритма является определение начального приближения поверхности восстанавливаемого объекта. В работах [6] в качестве такового предлагается использовать соприкасающийся па-

раболоид, параметры которого определяются значениями главных кривизн поверхности в "блестящей" точке. Последние, в свою очередь, определяются по результатам полного поляризационного приема.

Алгоритм получения значений главных кривизн основан на итерировании уравнении Фока относительно плотности поверхностного тока и определении двух членов лучевой асимптотики для рассеянного поля. Однако такой подход дает приемлемые результаты только при зондировании осесимметричных объектов, зондируемых с направлений, близких к осевым. Для неосевых ракурсов результат восстановления не имеет ничего общего с искомым объектом.

Формулирование цели статьи. В соответствии с указанным, целью статьи является разработка алгоритма определения геометрии РЛО вблизи "блестящей" точки, для использования в качестве начального приближения при восстановлении "освещенной" части поверхности гладкого выпуклого идеально проводящего объекта.

Изложение основного материала. Как уже отмечалось, использование в качестве начального приближения восстанавливаемой поверхности параболоида с вершиной в точке зеркального отражения и параметрами, определяемыми значениями главных кривизн поверхности РЛО в данной точке, дает требуемый результат только для направлений наблюдения вдоль оси симметрии или близких к ним. При неосевом зондировании объектов типа трехосного эллипсоида получаемое таким образом начальное приближение не соответствует искомой поверхности, поскольку в этом случае ее главные сечения не симметричны относительно направления наблюдения. Данная ситуация не может быть аппроксимирована с помощью параболоида, сечения которого, проходящие через вершину, симметричны относительно его оси.

Для того чтобы преодолеть указанные трудности предлагается использовать информацию, получаемую при зондировании с нескольких направлений. Учитывая специфику задачи (большие электрические размеры и выпуклость поверхности), можно утверждать, что каждое зондирование дает информацию о координатах соответствующей "блестящей" точки и о направлении нормали к поверхности в ней. Основываясь на этом, попытаемся аппроксимировать поверхность объекта в окрестности одной из "блестящих" точек поверхностью второго порядка с уравнением:

$$a_1x^2 + a_2y^2 + a_3z^2 + a_4xy + a_5yz + a_6xz + a_7x + a_8y + a_9z + a_{10} = 0, \quad (1)$$

где a_k – искомые коэффициенты.

Для этого выберем одну из "блестящих" точек в качестве центра системы координат $OXYZ$, в которой будет производиться реконструкция поверхности объекта. Ось OZ совпадает с направлением наблюдения. Оси OX и OY образуют вместе с ней правую тройку векторов. После этого пересчитаем координаты "блестящих" точек и компонент нормалей в них, получен-

ные при остальных зондированиях, в построенную систему координат.

Задача состоит в нахождении коэффициентов уравнения поверхности, наилучшим образом аппроксимирующей искомую по известным координатам n принадлежащих ей точек и нормальям к ней в этих точках.

Поскольку искомая поверхность полагается поверхностью второго порядка, то можно утверждать, что хотя бы один из коэффициентов группы старших членов ее уравнения отличен от нуля. Поделив почленно уравнение (1) по очереди на все коэффициенты группы старших членов, получим шесть вариантов записи уравнения аппроксимирующей поверхности. Это дает возможность построить систему из $3n$ независимых линейных алгебраических уравнений относительно девяти неизвестных. Таким образом, выполнив 3 или более зондирований под разными ракурсами, можно определить коэффициенты уравнения аппроксимирующей поверхности. Рассмотрим более подробно описанные действия.

Исходными данными являются направления зондирования $\bar{R}_i(R_{Xi}, R_{Yi}, R_{Zi})$ и координаты соответствующих им "блестящих" точек x_i, y_i, z_i , где $i = 1, \dots, n$.

Вариант 1. Пусть $a_1 \neq 0$.

$$b_1y^2 + b_2z^2 + b_3xy + b_4yz + b_5xz + b_6x + b_7y + b_8z + b_9 = -x^2, \text{ где } b_j = \frac{a_{j+1}}{a_1}.$$

Компоненты нормального такой поверхности вектора:

$$n_x = 2x + b_3y + b_5z + b_6; \quad n_y = 2b_1y + b_3x + b_4z + b_7; \quad n_z = 2b_2z + b_4y + b_5x + b_8.$$

Условие параллельности нормали к поверхности рассеивателя в "блестящей" точке орту направления зондирования $\frac{n_x}{R_x} = \frac{n_y}{R_y} = \frac{n_z}{R_z}$ дает возможность записать три уравнения для каждой из них:

$$R_y(2x + b_3y + b_5z + b_6) = R_x(2b_1y + b_3x + b_4z + b_7);$$

$$R_z(2x + b_3y + b_5z + b_6) = R_x(2b_2z + b_4y + b_5x + b_8);$$

$$R_y(2b_2z + b_4y + b_5x + b_8) = R_z(2b_1y + b_3x + b_4z + b_7),$$

из которых любые два будут независимыми.

Таким образом, можно записать систему из $3n$ независимых уравнений относительно неизвестных b_m ($m = 1, \dots, 9$):

$$\left\{ \begin{array}{l} b_1y_i^2 + b_2z_i^2 + b_3x_iy_i + b_4y_iz_i + b_5x_iz_i + b_6x_i + b_7y_i + b_8z_i + b_9 = -x_i^2; \\ b_1(-2R_{Xi}y_i) + b_3(R_{Yi}y_i - R_{Xi}x_i) + b_4(-R_{Xi}z_i) + \\ \quad + b_5R_{Yi}z_i + b_6R_{Yi} + b_7(-R_{Xi}) = -2R_{Yi}x_i; \\ b_2(-2R_{Xi}z_i) + b_3R_{Zi}y_i + b_4(-R_{Xi}y_i) + \\ \quad + b_5(R_{Zi}z_i - R_{Xi}x_i) + b_6R_{Zi} + b_8(-R_{Xi}) = 2R_{Zi}x_i, \end{array} \right.$$

решив которую, получим коэффициенты уравнения аппроксимирующей поверхности.

Аналогично строятся системы уравнений для остальных вариантов. Приведем для них окончательные выражения.

Вариант 2. Пусть $a_2 \neq 0$.

$$\left\{ \begin{array}{l} b_1 x_i^2 + b_2 z_i^2 + b_3 x_i y_i + b_4 y_i z_i + b_5 x_i z_i + b_6 x_i + b_7 y_i + b_8 z_i + b_9 = -y_i^2; \\ b_1 2R_{Y_i} x_i + b_3 (R_{Y_i} y_i - R_{X_i} x_i) + b_4 (-R_{X_i} z_i) + \\ + b_5 R_{Y_i} z_i + b_6 R_{Y_i} + b_7 (-R_{X_i}) = 2R_{X_i} y_i; \\ b_1 2R_{Z_i} x_i + b_2 (-2R_{X_i} z_i) + b_3 R_{Z_i} y_i + b_4 (-R_{X_i} y_i) + \\ + b_5 (R_{Z_i} z_i - R_{X_i} x_i) + b_6 R_{Z_i} + b_8 (-R_{X_i}) = 0. \end{array} \right.$$

Вариант 3. Пусть $a_3 \neq 0$.

$$\left\{ \begin{array}{l} b_1 x_i^2 + b_2 y_i^2 + b_3 x_i y_i + b_4 y_i z_i + b_5 x_i z_i + b_6 x_i + b_7 y_i + b_8 z_i + b_9 = -z_i^2; \\ b_1 2R_{Y_i} x_i + b_2 (-2R_{X_i} y_i) + b_3 (R_{Y_i} y_i - R_{X_i} x_i) + b_4 (-R_{X_i} z_i) + \\ + b_5 R_{Y_i} z_i + b_6 R_{Y_i} + b_7 (-R_{X_i}) = 0; \\ b_1 2R_{Z_i} x_i + b_3 R_{Z_i} y_i + b_4 (-R_{X_i} y_i) + b_5 (R_{Z_i} z_i - R_{X_i} x_i) + \\ + b_6 R_{Z_i} + b_8 (-R_{X_i}) = 2R_{X_i} z_i. \end{array} \right.$$

Вариант 4. Пусть $a_4 \neq 0$.

$$\left\{ \begin{array}{l} b_1 x_i^2 + b_2 y_i^2 + b_3 z_i^2 + b_4 y_i z_i + b_5 x_i z_i + b_6 x_i + b_7 y_i + b_8 z_i + b_9 = -x_i y_i; \\ b_1 2R_{Y_i} x_i + b_2 (-2R_{X_i} y_i) + b_4 (-R_{X_i} z_i) + b_5 R_{Y_i} z_i + \\ + b_6 R_{Y_i} + b_7 (-R_{X_i}) = R_{X_i} x_i - R_{Y_i} y_i, \\ b_2 (-2R_{Z_i} y_i) + b_3 2R_{Y_i} z_i + b_4 (R_{Y_i} y_i - R_{Z_i} z_i) + b_5 R_{Y_i} x_i + \\ + b_7 (-R_{Z_i}) + b_8 R_{Y_i} = R_{Z_i} x_i. \end{array} \right.$$

Вариант 5. Пусть $a_5 \neq 0$.

$$\left\{ \begin{array}{l} b_1 x_i^2 + b_2 y_i^2 + b_3 z_i^2 + b_4 x_i y_i + b_5 x_i z_i + b_6 x_i + b_7 y_i + b_8 z_i + b_9 = -y_i z_i; \\ b_1 2R_{Y_i} x_i + b_2 (-2R_{X_i} y_i) + b_4 (R_{Y_i} y_i - R_{X_i} x_i) + b_5 R_{Y_i} z_i + \\ + b_6 R_{Y_i} + b_7 (-R_{X_i}) = R_{X_i} z_i; \\ b_2 (-2R_{Z_i} y_i) + b_3 2R_{Y_i} z_i + b_4 (-R_{Z_i} x_i) + b_5 R_{Y_i} x_i + \\ + b_7 (-R_{Z_i}) + b_8 R_{Y_i} = R_{Z_i} z_i - R_{Y_i} y_i. \end{array} \right.$$

Вариант 6. Пусть $a_6 \neq 0$.

$$\left\{ \begin{array}{l} b_1 x_i^2 + b_2 y_i^2 + b_3 z_i^2 + b_4 x_i y_i + b_5 y_i z_i + b_6 x_i + b_7 y_i + b_8 z_i + b_9 = -x_i z_i; \\ b_1 2R_{Y_i} x_i + b_2 (-2R_{X_i} y_i) + b_4 (R_{Y_i} y_i - R_{X_i} x_i) + b_5 (-R_{X_i} z_i) + \\ + b_6 R_{Y_i} + b_7 (-R_{X_i}) = -R_{Y_i} z_i, \\ b_2 (-2R_{X_i} y_i) + b_3 2R_{Y_i} z_i + b_4 (-R_{Z_i} x_i) + b_5 (R_{Y_i} y_i - R_{Z_i} z_i) + \\ + b_7 (-R_{Z_i}) + b_8 R_{Y_i} = -R_{Y_i} x_i. \end{array} \right.$$

После определения коэффициентов b_m , в качестве искомой аппроксимирующей поверхности выбирается та из полученных шести, которая точнее всего приближает действительную (например, та, у которой минимальна сумма квадратов невязок между координатами ее точек и координатами соответствующих точек аппроксимируемой поверхности). После этого определяются координаты точки M_0 пересечения оси OZ с выбранной поверхностью и, таким образом, уточняется центр системы координат, в которой будет производиться реконструкция поверхности цели. После переноса системы координат в точку M_0 определяются координаты точек контура пересечения полученной аппроксимирующей поверхности с плоскостью $z = t_0$, ограничивающей продольный размер начального приближения и компоненты ортов нормалей и касательных в них. Тем самым определяется вся необходимая для работы алгоритма восстановления "освещенной" части поверхности гладкого выпуклого идеально проводящего объекта информация [6].

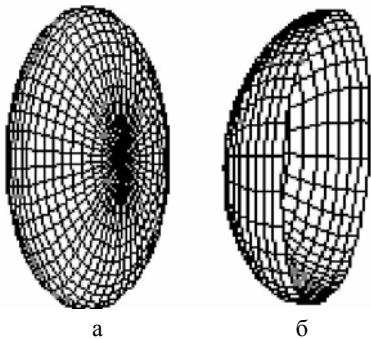


Рис. 1. Поверхность объекта:
а – действительная;
б – восстановленная

На основе предложенных в работе математических соотношений проведено моделирование определения начального приближения поверхности трехосного эллипсоида, характеризуемого соотношением между полуосями (1:2:3) при зондировании с направлений, лежащих в диапазоне углов $10 - 15^\circ$ относительно оси симметрии. После этого было проведено восстановление "освещенной" части поверхности указанного объекта с использованием алгоритма, предлагаемого в [6]. На рис.

1, а приведена действительная поверхность зондируемого объекта, на рис. 1, б – результат ее восстановления.

Восстановление осуществляется в полярных координатах – в каждом временном сечении $t = t_i$ точки искомой поверхности задаются по-

лярным углом φ и соответствующим радиусом-вектором $\rho(t, \varphi)$. Поэтому точность функционирования алгоритма восстановления оценивалась величиной относительной погрешности δ , определяемой по формуле

$$\delta(t, \varphi) = \frac{\rho(t, \varphi) - \hat{\rho}(t, \varphi)}{\rho(t, \varphi)} \cdot 100\%,$$

где $\rho(t, \varphi)$ – действительные координаты точек искомой поверхности; $\hat{\rho}(t, \varphi)$ – полученные в результате восстановления. Для рассматриваемых углов зондирования значение величины δ не превосходит 15%. Данный факт свидетельствует об адекватности начального приближения, определяемого в соответствии с предлагаемым в работе подходом.

Выводы. Таким образом, в данной статье приводится алгоритм определения геометрии поверхности РЛО вблизи точки зеркального отражения, позволяющий учитывать несимметричность главных сечений поверхности относительно направления наблюдения. Результаты, полученные с помощью предлагаемого алгоритма, могут использоваться в качестве начального приближения при восстановлении "освещенной" части поверхности объекта на основе методики, разработанной в [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Левис Р.М. Обратная задача дифракции // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1970. – № 2. – С. 100 – 112.
2. Рамм А.Г. Определение формы отражающего тела по характеристике рассеяния // *Радиофизика*. – 1970. – Т. XIII, № 5. – С. 727 – 731.
3. Стайнберг Б.Д. Формирование радиолокационного изображения самолета в диапазоне СВЧ // *ТИИЭР*. – 1988. – № 12. – С. 26 – 46.
4. Фархат Н.Х. Формирование радиолокационного изображения методом разнесения в диапазоне СВЧ и автоматизированная идентификация целей, основанная на использовании моделей нейронных сетей // *ТИИЭР*. – 1989. – № 5. – С. 43 – 56.
5. Лучин А.А. Методы решения обратной задачи дифракции в радиолокации // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1999. – № 8. – С. 30 – 44.
6. Сухаревский О.И., Музыченко А.В. Алгоритм восстановления "освещенной" части выпуклой идеально проводящей поверхности // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2000 – Т. 5, № 3. – С. 311 – 319.
7. Sukharevsky O.I., Vasilets V.A. Impulse characteristics of smooth objects in bistatic case // *Journal of electromagnetic waves and applications, Cambridge, USA*. – 1996. – Vol.10. – P. 1613 – 1622.

Поступила 15.03.2005

Рецензент: доктор физико-математических наук ст. научный сотрудник В.К. Иванов, Институт радиофизики и электроники НАН Украины, Харьков.