

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ В СВЕРХКОРОТКОИМПУЛЬСНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

Коновалюк М.А., Кузнецов Ю.В., Баев А.Б.
Московский авиационный институт
(государственный технический университет)
Email: mai@mai-trt.ru

Когерентные сверхкороткоимпульсные РЛС позволяют получить радиолокационные изображения объектов высокого разрешения. Модель такого изображения основана на суперпозиции откликов от совокупности точечных центров рассеяния объекта. На координатной плоскости дальность-азимут значения комплексной огибающей сигналов, отраженных от центров рассеяния радиолокационного объекта, определяются в соответствии с положением и коэффициентами отражения отдельных центров рассеяния. Предложенная модель учитывает форму зондирующего импульса и форму диаграммы направленности антенны. Параметры центров рассеяния объектов определяются в частотной области в двух ортогональных сечениях двумерного преобразования Фурье радиолокационного изображения. В качестве метода параметрической идентификации в работе был использован метод матричных пучков (Matrix pencil method). В работе представлены результаты параметрической идентификации модели трехточечного радиолокационного объекта. Научно-исследовательская работа по данной тематике проводится в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные методы цифровой обработки радиолокационных сигналов позволяют получать большое количество информации о наблюдаемых объектах [1]. С использованием этой информации можно решать различные задачи радиолокации: получение радиолокационных изображений объектов высокой степени детализации, сопровождение объектов, распознавание целей и др.

Во многих радиолокационных задачах требуется большая точность измерения параметров (дальности, азимута, доплеровского смещения и др.) отраженных от объектов сигналов. Известно, что точность измерения этих параметров зависит от разрешающей способности радиолокационной станции (РЛС) по этим параметрам.

В данной работе рассматривается задача определения параметров сигналов в сверхкороткоимпульсной (СКИ) радиолокации. Сигналы в СКИ радиолокации представляют собой радиоимпульсы малой длительности. Так для рассматриваемой в работе СКИ РЛС длительность зондирующего импульса составляет 10 нс, что соответствует разрешению по дальности порядка 1,5 м.

Известно, что отклик протяженного радиолокационного объекта на короткий зондирующий импульс может быть описан совокупностью откликов от «блестящих» точек [2]. Отклики от «блестящих» точек могут рассматриваться как сигналы, отраженные точечными рассеивателями цели. Информация о взаимном расположении наиболее мощных «блестящих» точек целей может служить основой для составления банка данных объектов и может быть использована для их распознавания. Однако расстояние между отдельными центрами рассеяния может быть гораздо меньше разрешающей способности РЛС, что значительно затрудняет распознавание объекта непосредственно по его радиолокационному портрету.

В данной работе рассматривается применение алгоритма параметрической идентификации объектов в СКИ радиолокации, позволяющего определить положения близкорасположенных центров рассеяния объекта с использованием его комплексного радиолокационного изображения (РЛИ).

2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЦЕНТРОВ РАССЕЯНИЯ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

Процедура параметрической идентификации основывается на модели радиолокационного сигнала, отраженного от точечных центров рассеяния [3, 4]. Комплексная огибающая радиолокационного сигнала, отраженного p -м центром рассеяния, может быть представлена в виде:

$$\dot{s}_p(t) = a_p \cdot \exp\{-j2\pi f_0 t_p - \psi_p\} = \dot{a}_p \cdot s(t - t_p), \quad (1)$$

где a_p и ψ_p – амплитуда и фаза коэффициентов отражения; $s(t)$ – огибающая зондирующего радиолокационного импульса; t_p – задержка, обусловленная временем распространения электромагнитной волны от антенны до центра рассеяния; f_0 – несущая частота. Комплексное радиолокационное изображение является зависимостью комплексной огибающей радиолокационного сигнала, отраженного от P центров рассеяния и наблюдаемого в присутствии шума, от дальности r и угла азимута φ :

$$\dot{x}(r, \varphi) = \sum_{p=1}^P \dot{s}_p(r) \cdot f_A^2(\varphi - \varphi_p) + \dot{n}(r, \varphi), \quad (2)$$

где $f_A(\varphi)$ – диаграмма направленности антенны; φ_p – угол азимута в направлении на p -й центр рассеяния; $\dot{n}(r, \varphi)$ – комплексная огибающая белого гауссовского шума в пределах ширины спектра радиолокационного сигнала.

Дискретное комплексное изображение цели определяется в пределах интервала по дальности $[r_{min}; r_{max}]$ и интервала по азимуту $[\varphi_{min}; \varphi_{max}]$:

$$\dot{x}[n, m] = \dot{x}(\rho_n, \theta_m) = \sum_{p=1}^P \dot{a}_p \cdot s(\rho_n - r_p) \cdot f_A^2(\varphi - \varphi_p) + \dot{n}(r, \varphi), \quad (3)$$

где

$$\rho_n = r_{min} + \frac{n-1}{N-1} \cdot (r_{max} - r_{min}), \quad n = 1, 2, \dots, N; \quad (4a)$$

$$\theta_m = \varphi_{min} + \frac{m-1}{M-1} \cdot (\varphi_{max} - \varphi_{min}), \quad m = 1, 2, \dots, M. \quad (4b)$$

Для комплексного радиолокационного изображения двумерное дискретное преобразование Фурье (ДПФ) определяется выражением:

$$\dot{X}[v, \mu] = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \dot{x}[n, m] \cdot e^{-j2\pi\left(\frac{v}{N} \cdot n + \frac{\mu}{M} \cdot m\right)}, \quad v = 0, 1, \dots, N-1; \quad \mu = 0, 1, \dots, M-1. \quad (5)$$

Два ортогональных сечения в частотной области могут быть выделены из двумерного ДПФ (5) и после простого алгебраического преобразования могут быть представлены в следующем виде:

$$\dot{X}_\theta[v] = \dot{X}[v, 0] = \sum_{n=1}^N \dot{x}_\theta[n] \cdot e^{-j2\pi \cdot \frac{v}{N} \cdot n}, \quad v = 0, 1, \dots, N-1; \quad (6a)$$

$$\dot{X}_\rho[\mu] = \dot{X}[0, \mu] = \sum_{m=1}^M \dot{x}_\rho[m] \cdot e^{-j2\pi \cdot \frac{\mu}{M} \cdot m}, \quad \mu = 0, 1, \dots, M-1. \quad (6b)$$

Следующим шагом предлагаемого алгоритма является формирование двух матриц Ханкеля для данных в частотной области (6а, 6б), над которыми предварительно осуществляется операция обращения свертки в соответствии с формой огибающей радиолокационного импульса и формой диаграммы направленности антенны:

$$\dot{\mathbf{H}} = \begin{pmatrix} \dot{y}_0 & \dot{y}_1 & \cdots & \dot{y}_J \\ \dot{y}_1 & \dot{y}_2 & \cdots & \dot{y}_{J-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \dot{y}_{\{L,K\}-J-1} & \dot{y}_{\{L,K\}-J} & \cdots & \dot{y}_{\{L,K\}-1} \end{pmatrix}, \quad J < \frac{\{L,K\}}{2}, \quad (7)$$

где \dot{y} – результат обращения свертки для данных в частотной области; $L < N/2$ и $K < M/2$ – количество отсчетов данных.

В соответствии с методом матричных пучков [5] координаты точечных центров рассеяния по дальности и азимуту на плоскости дискретного радиолокационного изображения можно получить следующим образом:

$$r_p = -\frac{1}{2\pi} \cdot \arg(\dot{z}_{\theta p}) \cdot (r_{\max} - r_{\min}) + r_{\min}, \quad (8a)$$

$$\varphi_p = -\frac{1}{2\pi} \cdot \arg(\dot{z}_{\rho p}) \cdot (\varphi_{\max} - \varphi_{\min}) + \varphi_{\min}, \quad p = 1, 2, \dots, P, \quad (8б)$$

где $\dot{z}_{\theta p}$ и $\dot{z}_{\rho p}$ – полюса, определенные для двух ортогональных сечений в частотной области.

Общее количество полюсов соответствует количеству значащих сингулярных чисел матриц Ханкеля.

На заключительном этапе алгоритма амплитуды и фазы коэффициентов отражения определяются методом наименьших квадратов. Таким образом, предложенный алгоритм позволяет провести идентификацию параметров центров рассеяния радиолокационных объектов на основе анализа их радиолокационного изображения.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численное моделирование процедуры параметрической идентификации проводилось для неподвижного объекта, описываемого тремя «блестящими» точками различной интенсивности. Объект наблюдался на расстоянии 50 м. Модель принимаемого радиолокационного сигнала содержит в себе отклики от центров рассеяния и аддитивный гауссовский шум в полосе сигнала. Отношение сигнал/шум в модели было выбрано равным 20 дБ. Полученные результаты моделирования требуют анализа для определения подхода к обработке реальных данных. Амплитудное и фазовое распределение модели принятого радиолокационного изображения показано на рис. 1. Области, отмеченные на графиках цифрами 1, 2 и 3, соответствуют положениям центров рассеяния. Нумерация выбрана в порядке убывания уровня интенсивности «блестящей» точки.

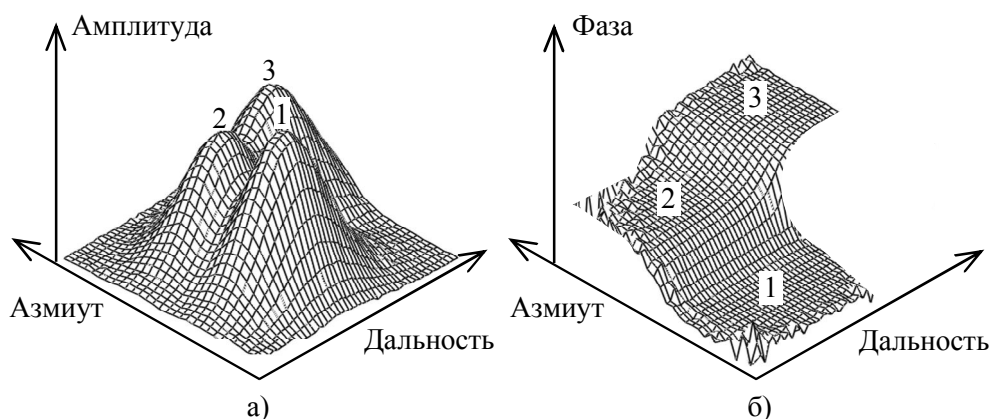


Рис. 1. Распределение амплитуды (а) и фазы (б) радиолокационного сигнала, рассеянного тремя «блестящими» точками.

Рассматриваемый радиолокационный отклик представлен на рис. 2 в виде нескольких дальностных сечений отклика, изображенных пунктирными линиями. Из рисунка видно, что сечения обладают ярко выраженными локальными максимумами, количество которых может указывать на присутствие в принятом сигнале откликов, как от одиночного центра рассеяния, так и от двух центров рассеяния, близко расположенных по дальности. Оценка дальности в таких сечениях непосредственно по принятому сигналу затруднена недостаточным разрешением

для локализации отдельных «блестящих» точек объекта, действием шума и интерференцией отраженных сигналов от нескольких центров рассеяния.

В результате когерентной обработки РЛИ вдоль азимутальных сечений при помощи соответствующей процедуры (построчное БПФ) предложенного алгоритма был получен сигнал, изображенный на рис. 2 сплошной линией. Этот сигнал содержит отклики от всех центров рассеяния и подлежит обработке с использованием последующего этапа алгоритма. На этом этапе определяется преобразование Фурье сигнала и проводится оценка по квадратурным составляющим спектра сигнала числа «блестящих» точек, дальности и уровня интенсивности рассеяния каждого центра рассеяния. Оценки расстояний до центров рассеяния, а также уровни интенсивности их отражения, полученные по результатам обработки РЛИ по дальности, показаны рис. 2 вертикальными стрелками с указанными номерами соответствующих им центрам рассеяния.

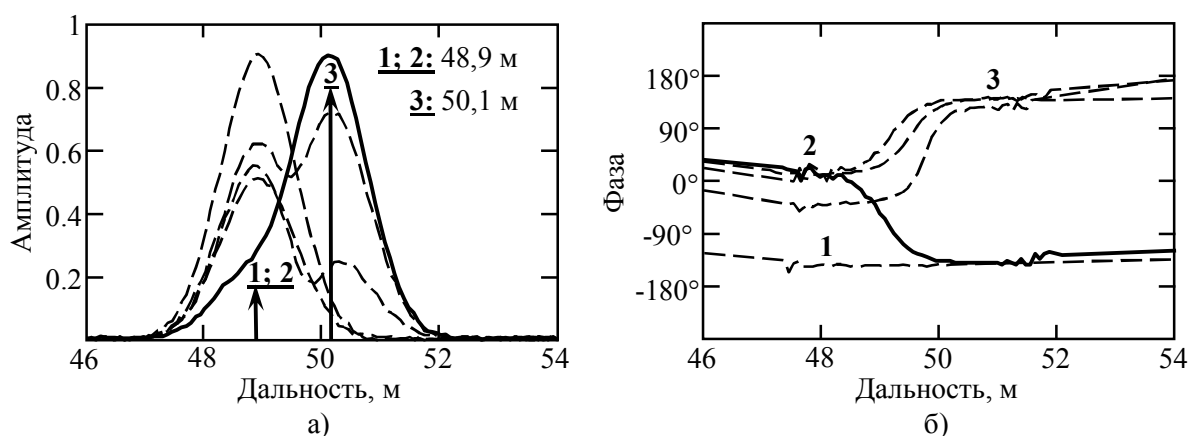


Рис. 2. Распределение амплитуды (а) и фазы (б) в дальностных сечениях откликов (пунктирные линии) и когерентно накопленного по азимуту сигнала (сплошная линия).

Из рисунка видно, что оценки дальности: 48,9 м для центров рассеяния 1 и 2; 50,1 м для центра рассеяния 3, – соответствуют расположению «блестящих» точек внутри элемента разрешения по дальности радиолокационного изображения объекта на расстоянии 1,2 м. Оценки амплитуд сигналов, отраженных «блестящими» точками объекта, указаны высотой стрелок. Представленные на рисунке результаты идентификации демонстрируют неразличимость «блестящих» точек 1 и 2 при практически полном совпадении их дальности. При этом остается неизвестным положение центров рассеяния по азимуту, кроме того, оценка уровня интенсивности «блестящих» точек несостоятельна без проведения аналогичного этапа алгоритма идентификации для азимутальных сечений РЛИ объекта.

На рис. 3 представлено несколько азимутальных сечений радиолокационного отклика объекта, изображенных пунктирными линиями. Сигнал, полученный в результате когерентной обработки РЛИ по дальности, показан на рис. 3 сплошной линией. Оценка параметров «блестящих» точек объекта была проведена по квадратурным составляющим спектра этого сигнала. На рисунке вертикальными стрелками с указанными номерами соответствующих им центров рассеяния показаны оценки расположения «блестящих» точек по азимуту: 59,4° для центра рассеяния 1; 60,2° для центра рассеяния 2; 60,5° для центра рассеяния 3, – и уровни отраженных ими сигналов, изображенные соответствующей высотой стрелок. Оценка координат азимута «блестящих» точек показывает, что минимальное угловое расстояние между «блестящими» точками составляет 0,3°, что значительно меньше разрешения РЛИ по азимуту. Оценки амплитуд отраженных сигналов «блестящими» точками были получены для всех трех центров рассеяния.

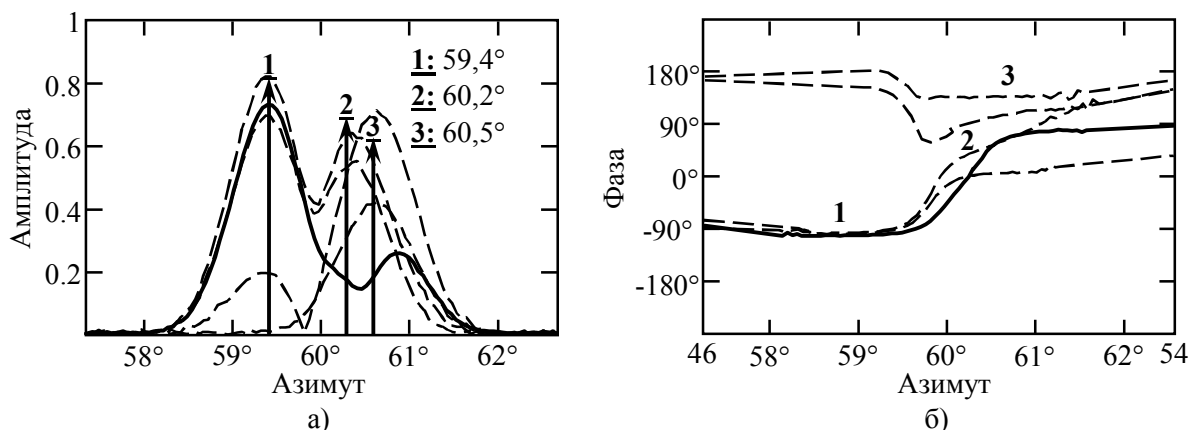


Рис. 3. Распределение амплитуды (а) и фазы (б) в азимутальных сечениях откликов (пунктирные линии) и когерентно накопленного по азимуту сигнала (сплошная линия).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлена модель для описания радиолокационных сигналов когерентно-импульсной РЛС, обладающей высокой разрешающей способностью по дальности за счет малой длительности зондирующего сигнала. В этом случае наблюдаемый радиолокационный сигнал может быть описан как суперпозиция откликов от отдельных «блестящих» точек цели.

Для оценивания параметров модели используется алгоритм параметрической идентификации сигнала в частотной области. Полученные в результате оценивания параметры модели принимаемого радиолокационного сигнала могут рассматриваться как параметры наиболее мощных эквивалентных точечных центров рассеяния. Наблюдение поведения рассеивающих свойств объекта по ограниченному числу его «блестящих» точек может быть практически использовано для распознавания радиолокационных целей.

Анализ результатов численного моделирования идентификации радиолокационного объекта показывает возможность оценивания уровня интенсивности, координат дальности и азимута центров рассеяния, расположенных внутри элемента разрешения РЛИ на расстоянии не менее 50% разрешающей способности при выбранном отношении сигнал/шум (20 дБ).

ЛИТЕРАТУРА

1. К.М. Cuomo, J.E. Piou, and J.T. Mayhan, “Ultra-Wideband Coherent Processing”, *Linc. Lab. J.* 10 (2) 1997, pp. 203-221.
2. Коновалюк М.А., Баев А.Б., Кузнецов Ю.В. «Оценивание параметров радиолокационных сигналов в сверхкороткоимпульсной радиолокации», 10-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение», М.: ИПУ РАН, стр. 374–377, март 2008 г.
3. М. Konovaluk, Y. Kuznetsov, A. Baev, “Point Scatterers Target Identification Using Frequency Domain Signal Processing”, in 17th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, Wroclaw, Poland, pp.429–432, May 2008.
4. August W. Rihaczek, Stephen J. Hershkowitz, *Theory and practice of radar target identification*, Artech House, 2000.
5. Tapan K. Sarkar and Odilon Pereira, Using the Matrix Pencil Method to estimate the parameters of a sum of complex exponentials, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 37, No. 1, February 1995.