

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МНОГОТОЧЕЧНЫХ ЦЕЛЕЙ ПО СПЕКТРУ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

КУЗНЕЦОВ Юрий Владимирович, заведующий кафедрой Московского авиационного института (государственного технического университета), д.т.н., профессор.

KUZNETSOV Yuriy V. - Moscow Aviation Institute (State University of Aerospace Technologies), Head of the Theoretical Radio Engineering Department, D.Sci., Professor

БАЕВ Андрей Борисович, доцент Московского авиационного института (государственного технического университета), к.т.н.

BAEV Andrey B. - Moscow Aviation Institute (State University of Aerospace Technologies), Associate Professor of the Theoretical Radio Engineering Department, Ph.D.

КОНОВАЛЮК Максим Александрович, аспирант Московского авиационного института (государственного технического университета).

Тел. (499)-158-40-47, e-mail: konovaluk@mai-trt.ru

KONOVALUK Maxim A. Moscow Aviation Institute (State University of Aerospace Technologies), Assistant Professor of the Theoretical Radio Engineering Department.

Тел.: +7 499 158-4047, e-mail: konovaluk@mai-trt.ru

Когерентные сверхкороткоимпульсные радиолокационные станции (РЛС) позволяют получать радиолокационные изображения объектов с высоким разрешением. Модель такого изображения основана на суперпозиции откликов от совокупности точечных центров рассеяния объекта и учитывает форму зондирующего импульса и форму диаграммы направленности антенны. Параметры центров рассеяния объектов определяются в частотной области в двух ортогональных сечениях двумерного быстрого преобразования Фурье (БПФ) радиолокационного изображения. В работе представлены результаты параметрической идентификации модели трехточечного радиолокационного объекта. НИР по данной тематике проводится в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 — 2013 годы (Мероприятие 1.3.2 «Проведение научных исследований целевыми аспирантами»; Государственный контракт № П1041 от 20.08.09 г.).

The coherent ultra short pulse radar provides high resolution image of the target. A model of this image is the superposition of the complex envelopes of the signals returned from the point scatterers. The values of the complex envelopes are distributed over radar image coordinate plane in accordance with their positions and reflection coefficients. Radar image model is based on the known radar pulse envelope and a pattern of the antenna. The parameters of the target point scatterers are processed in the frequency domain by using of one dimensional data extracted from the two dimensional FFT of the radar image.

Ключевые слова: сверхкороткоимпульсная радиолокация, точечный рассеиватель, комплексное радиолокационное изображение, параметрическая идентификация.

Key words: ultra short pulse radar, point scatterer, complex radar image, parametrical identification.

Введение

Современные широкополосные РЛС позволяют получать изображение целей и объектов с высоким разрешением [1, 2]. Высокое разрешение по дальности широкополосных РЛС обеспечивается за счет большой ширины спектра зондирующего сигнала. Это достигается путем уменьшения его длительности во временной области. РЛС, использующие в качестве зондирующего сигнала малые по длительности радиоимпульсы без внутриимпульс-

ной модуляции несущей, получили название сверхкороткоимпульсных (СКИ) РЛС.

Радиолокационные изображения объектов, полученные с использованием широкополосных радиолокаторов, могут быть использованы для идентификации и распознавания целей в режиме реального времени [3].

Рассматриваемый в работе алгоритм цифровой обработки сигналов относится к классу алгоритмов,

использующих параметрическую идентификацию сигналов в частотной области [4]. Для применения такого алгоритма необходимо синтезировать модель радиолокационного сигнала, параметры которой требуется идентифицировать.

В работе рассмотрена модель комплексного радиолокационного изображения многоточечного объекта. Данная модель получена исходя из представлений о физических процессах рассеяния электромагнитного излучения радиолокатора. Для упрощения анализа процессов рассеяния может быть использован широко распространенный подход, основанный на точечной модели эффективных центров рассеяния радиолокационных объектов [5]. В сантиметровом диапазоне длин волн амплитуда отраженной волны каждой «блестящей» точкой объекта в полосе частот зондирующего сигнала СКИ радиолокатора может быть принята постоянной. Основным механизмом взаимодействия электромагнитных полей в присутствии нескольких центров рассеяния объекта является интерференция. Принятый радиолокационный сигнал, рассеянный радиолокационным объектом, может быть рассмотрен как суперпозиция сигналов от каждой «блестящей» точки цели. При этом в СКИ радиолокации предполагается, что сигнал, рассеянный отдельной «блестящей» точкой, практически совпадает по форме с зондирующим сигналом.

В работе предложено определять координаты взаимного положения «блестящих» точек и комплексные коэффициенты отражения каждого центра рассеяния объекта, которые могут быть использованы для распознавания объектов в СКИ радиолокации. Определение информативных параметров центров рассеяния радиолокационных объектов в представленной работе производится в частотной области. На основе анализа спектров сигналов, рассеянных объектом, определяются параметры отдельных рассеивателей цели. При этом использованный в работе параметрический алгоритм позволил увеличить точность оценки координат отдельных центров рассеяния.

При идентификации радиолокационных объектов параметры модели должны обеспечивать наилучшую с точки зрения выбранного критерия точность описания измеренного сигнала. Наиболее распространенным критерием является критерий минимума среднеквадратической ошибки. Для разработки алгоритма параметрической идентификации была использована модель радиолокационного изображения объекта, описываемого несколькими центрами рассеяния.

Рассеяние радиолокационного сигнала сложной целью

В теории рассеяния радиолокационного излучения считается, что отдельные элементы объекта рассеивают энергию падающей электромагнитной волны независимо друг от друга и объект рассматривается как совокупность центров рассеяния, каждый из которых является независимой «блестящей» точкой. Так, в простейшем случае каждый центр рассеяния объекта может представлять собой точечный отражатель.

Существует ряд факторов, определяющих преобразование радиолокационного сигнала при его рассеянии целью. Во-первых, в зависимости от геометрии и ориентации объекта один облучающий радиолокационный импульс преобразуется в совокупность взвешенных и задержанных импульсов, отраженных от каждого центра рассеяния этого объекта. Во-вторых, характер поведения центра рассеяния в частотной области в пределах полосы частот зондирующего импульса может повлиять на форму отраженного импульса.

Наиболее сложную частотную зависимость центров рассеяния можно наблюдать при широкополосном облучении объекта. Вследствие широкой полосы частот зондирующего сигнала центр рассеяния может по-разному вести себя на отдельных участках спектра сигнала. При описании влияния отдельных рассеивающих элементов на форму отраженных сигналов во временной области прибегают к использованию импульсных характеристик центров рассеяния объекта.

На практике в СКИ радиолокации принято считать форму сигнала, отраженного от точечных центров рассеяния, практически неизменной по сравнению с формой зондирующего сигнала.

При активном методе радиолокации отраженный сигнал будет задержан на время распространения электромагнитной волны от радиолокатора до цели и обратно. Амплитуда сигнала будет зависеть от дальности до цели и ракурса наблюдения цели. На амплитуду сигнала также оказывает влияние форма и направление главного луча диаграммы направленности антенной системы СКИ РЛС.

Комплексная огибающая радиолокационного сигнала, отраженного p -м центром рассеяния, может быть представлена в виде

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

где a_p и ψ_p — амплитуда и фаза комплексной огибающей сигнала, рассеянного p -м центром рассеяния; $s(t)$ — огибающая зондирующего радиолока-

ционного импульса; t_p — задержка, обусловленная временем распространения электромагнитной волны от антенны до центра рассеяния; f_0 — несущая частота.

Комплексная огибающая сигнала, отраженного неподвижным рассеивающим объектом сложной формы, определяется суперпозицией комплексных огибающих сигналов, отраженных от конечного числа центров рассеяния этого объекта. Суммарная комплексная огибающая является результатом векторного сложения ее составляющих. Таким образом, можно описать возникающую интерференцию волн, отраженных от разных элементов объекта, при его облучении радиолокационным сигналом. Возможны случаи, когда векторные составляющие при сложении полностью компенсируют друг друга, и возникает деструктивная интерференция. Наоборот, когда векторные составляющие совпадают по направлению, возникает конструктивная интерференция.

Модель комплексного радиолокационного изображения многоточечной цели

Комплексное радиолокационное изображение является зависимостью от дальности r и угла азимута φ значений комплексной огибающей принятого радиолокационного сигнала, рассеянного P центрами рассеяния объекта:

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

где \dot{a}_p — комплексная амплитуда; φ_p — координата азимута p -го центра рассеяния объекта; r_p — координата дальности p -го центра рассеяния объекта; $s(r)$ — огибающая радиолокационного сигнала; $f_A(\varphi)$ — характеристика направленности антенны; $\dot{w}(r, \varphi)$ — комплексная огибающая белого гауссовского шума в полосе частот приемного тракта.

Отношение сигнал/шум для радиолокационного изображения может быть вычислено по следующей формуле:

$$SNR = \frac{\int_0^{R_{\max}} \int_0^{2\pi} \left| \sum_{p=1}^P \dot{a}_p \cdot s(r - r_p) \cdot f_A^2(\varphi - \varphi_p) \right|^2 dr d\varphi}{2\pi R_{\max} \cdot \sigma^2}, \quad (3)$$

где R_{\max} — максимальная дальность РЛС; σ^2 — дисперсия шума $\dot{w}(r, \varphi)$.

Математическая модель РЛИ объекта в пределах интервала по дальности $[r_{\min}, r_{\max}]$ и интервала по азимуту $[\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$ может быть представлена в следующем виде:

$$\dot{x}[n, m] = \sum_{p=1}^P \dot{a}_p \cdot s(\rho_n - r_p) \cdot f_A^2(\theta_m - \varphi_p) + \dot{w}[n, m], \quad (4)$$

где дискретные значения дальности и угла азимута определяются выражениями:

$$\rho_n = r_{\min} + \frac{n-1}{N-1}(r_{\max} - r_{\min}), \quad n = 0, 1, \dots, N-1; \quad (5)$$

$$\theta_m = \varphi_{\min} + \frac{m-1}{M-1}(\varphi_{\max} - \varphi_{\min}), \quad m = 0, 1, \dots, M-1. \quad (6)$$

Модуль и аргумент комплексного РЛИ формируют соответственно амплитудное и фазовое распределение значений радиолокационного сигнала, отраженного от цели. Сложность характера изменения амплитудного и фазового распределений определяется близостью расположения центров рассеяния радиолокационного объекта.

На рис. 1 представлен пример амплитудного распределения радиолокационного сигнала трехточечного объекта.

На рисунке видно, что отклики от элементов отражения A и B радиолокационного объекта не разрешаются и сливаются в суммарный и расширенный отклик по сравнению с каждым парциальным откликом. Отклик от элемента отражения C радиолокационного объекта имеет меньшую интенсивность, однако наблюдается отдельно.

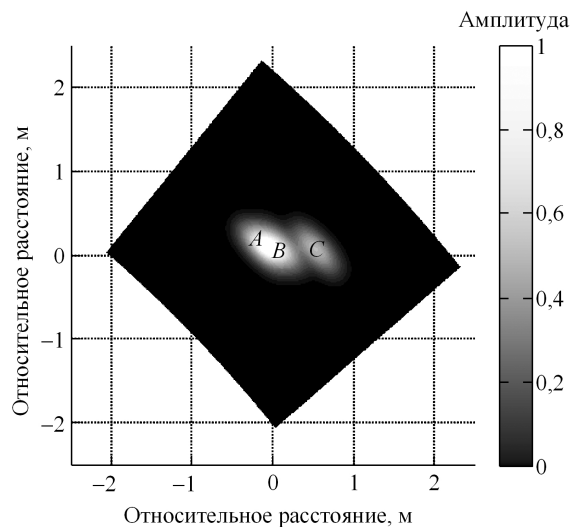


Рис. 1. Амплитудное распределение комплексного радиолокационного изображения трехточечного объекта

На рис. 2 представлено фазовое распределение радиолокационного сигнала трехточечного объекта. На рисунке ясно виден переход фазы суммарного отклика центров рассеяния *A* и *B* к фазе одиночного отклика центра рассеяния *C*. Ясно различимы на представленном рисунке специфические фазовые скачки, обусловленные нулями характеристики направленности антенны по мощности.

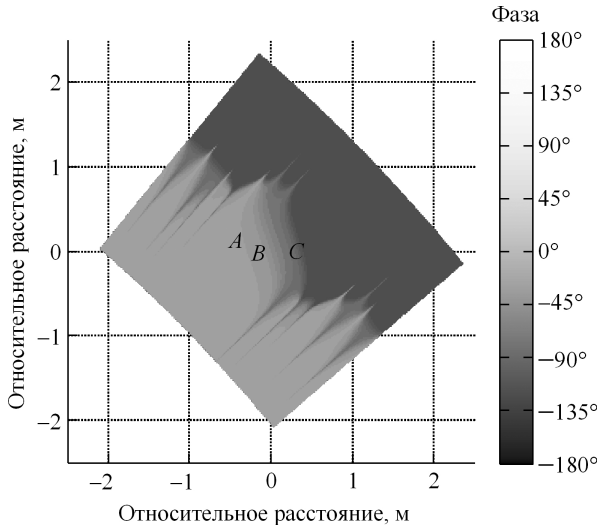


Рис. 2. Фазовое распределение комплексного радиолокационного изображения трехточечного объекта

Характеристиками комплексного РЛИ являются амплитудное и фазовое распределение на координатной плоскости. Сложный характер их изменения для малоразмерного многоточечного объекта обусловлен суперпозицией парциальных откликов от отдельных центров рассеяния, расположенных на расстояниях порядка размера одного элемента разрешения РЛИ.

Идентификация параметров центров рассеяния в спектральной области

Параметрическая идентификация объекта в СКИ радиолокации состоит из ряда процедур обработки РЛИ в соответствии с выбранной моделью принятого радиолокационного сигнала [3]. Целью идентификации является численное определение параметров модели, являющейся приближением к наблюдаемым данным в смысле минимума среднеквадратической ошибки.

Спектр комплексной огибающей радиолокационного сигнала, отраженного *p*-м центром рассеяния (1), может быть представлен в виде

$$\dot{S}_p(f) = \dot{a}_p \cdot \dot{S}(f) \cdot e^{-j2\pi f t_p}, \quad (7)$$

где $\dot{S}(f)$ — спектр комплексной огибающей зондирующего сигнала.

Для дискретного комплексного РЛИ объекта может быть вычислено его двумерное дискретное преобразование Фурье (ДПФ) по формуле

$$\dot{X}[v, \mu] = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \dot{x}[n, m] e^{-j2\pi \left(\frac{v}{N} n + \frac{\mu}{M} m \right)}, \quad (8)$$

$$v = 0, 1, \dots, N-1; \mu = 0, 1, \dots, M-1.$$

Модель характеристики точечных центров рассеяния объекта в спектральной области дискретного РЛИ может быть описана в виде:

$$\dot{Z}[v, \mu] = \sum_{p=1}^P \dot{a}_p e^{-j(\alpha_p v + \beta_p \mu)}, \quad (9)$$

где

$$\alpha_p = 2\pi \frac{r_p - r_{\min}}{r_{\max} - r_{\min}}; \quad (10)$$

$$\beta_p = 2\pi \frac{\varphi_p - \varphi_{\min}}{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}} \quad (11)$$

— параметры пространственного спектра для *p*-го центра рассеяния объекта.

Форма двумерного пространственного спектра одиночного радиолокационного отклика *p*-го центра рассеяния объекта определяется независимо вдоль одной пространственной частоты спектром известной огибающей сигнала $s(r)$, а вдоль другой — спектром известной характеристики направленности антенны по мощности $f_A^2(\varphi)$. Таким образом, двумерный пространственный спектр одиночного радиолокационного отклика является двумерной весовой функцией $\dot{D}[v, \mu]$ спектральных отсчетов $\dot{Z}[v, \mu]$ для многоточечного объекта.

Для получения характеристики точечных центров рассеяния объекта в спектральной области дискретного РЛИ необходимо скомпенсировать весовую функцию $\dot{D}[v, \mu]$ для двумерного ДПФ $\dot{X}[v, \mu]$:

$$\dot{Y}[v, \mu] = \frac{\dot{X}[v, \mu]}{\dot{D}[v, \mu]} = \dot{Z}[v, \mu] + \frac{\dot{W}[v, \mu]}{\dot{D}[v, \mu]}, \quad (12)$$

$$v = 0, 1, \dots, R-1; \mu = 0, 1, \dots, Q-1,$$

где $R < N$ и $Q < M$ определяются эффективными протяженностями спектра огибающей сигнала $s(r)$ и спектра характеристики направленности антенны по мощности $f_A^2(\varphi)$ соответственно; $\dot{W}[v, \mu]$ — двумерное ДПФ отсчетов шума $\dot{w}[n, m]$.

Две выборки отсчетов двумерной последовательности $\dot{Y}[v, \mu]$ при $v = 0$ и $\mu = 0$ могут быть вычислены с использованием следующих выражений:

$$\dot{y}_\theta[v] = \dot{Y}[v, 0] = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} \left(\sum_{m=0}^{M-1} \dot{x}[n, m] \right) \cdot e^{-j2\pi \frac{v}{N} n}}{\dot{D}[v, 0]}; \quad (13)$$

$$\dot{y}_\rho[\mu] = \dot{X}[0, \mu] = \frac{\sum_{m=0}^{M-1} \left(\sum_{n=0}^{N-1} \dot{x}[n, m] \right) \cdot e^{-j2\pi \frac{\mu}{M} m}}{\dot{D}[0, \mu]}. \quad (14)$$

Из вектора данных

$$\dot{y} = [\dot{y}_0 \quad \dot{y}_1 \quad \dot{y}_2 \quad \dots \quad \dot{y}_k \quad \dots \quad \dot{y}_{K-1}]^T,$$

полученного для каждой последовательности спектральных отсчетов в следующем виде:

$$\dot{y}_k = \{\dot{y}_\theta[k], \dot{y}_\rho[k]\}, \quad k = 0, 1, \dots, K-1, \quad (15)$$

требуется сформировать матрицу данных, имеющую вид матрицы Ханкеля:

$$\dot{Y} = \begin{pmatrix} \dot{y}_0 & \dot{y}_1 & \dots & \dot{y}_L \\ \dot{y}_1 & \dot{y}_2 & \dots & \dot{y}_{L-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \dot{y}_{K-L-1} & \dot{y}_{K-L} & \dots & \dot{y}_{K-1} \end{pmatrix}, \quad L < \frac{K}{2}, \quad (16)$$

где $K = \{R, Q\}$ — количество отсчетов данных, содержащихся в векторе данных \dot{y} .

Оценки координат дальности и азимута положения p -го центра рассеяния могут быть получены по формулам:

$$r_p = -\frac{\arg(\dot{z}_{\theta p})}{2\pi} (r_{\max} - r_{\min}) + r_{\min}; \quad (17)$$

$$\varphi_p = -\frac{\arg(\dot{z}_{\rho p})}{2\pi} (\varphi_{\max} - \varphi_{\min}) + \varphi_{\min}, \quad (18)$$

где $\dot{z}_{\theta p}$ и $\dot{z}_{\rho p}$ — значения полюсов последовательностей спектральных отсчетов $\dot{y}_\theta[v]$ и $\dot{y}_\rho[v]$ соответственно, полученные с использованием метода матричных пучков (Matrix pencil method) [8].

Результаты численного моделирования

С целью оценки координат центров рассеяния радиолокационного объекта предложенным выше методом была синтезирована компьютерная модель отклика от объекта, состоящего из трех точечных

рассеивателей. Дискретное радиолокационное изображение было смоделировано на координатной плоскости дальность—азимут в $500 \times 500 = 2500$ точках. Комплексное изображение представлено на рис. 3 двумя картами уровней амплитудного и фазового распределения. Распределения изображены в границах интервала по дальности [49,25 м; 50,75 м] и интервала по углу азимута [57,5°; 62,5°]. Отношение сигнал/шум приблизительно равно 20 дБ. Параметры центров рассеяния представлены в таблице.

Параметры центров рассеяния

Центр рассеяния	Дальность, м	Азимут	Амплитуда	Фаза, рад
№ 1	49,96	60,40°	0,26	-1,89
№ 2	49,99	59,63°	0,69	-2,50
№ 3	50,15	59,71°	0,32	-1,61

Огибающая зондирующего радиолокационного сигнала представляет собой гауссовский импульс:

$$s(t) = \exp\{-\pi(t/\tau)^2\}, \quad (19)$$

где $\tau = 2$ нс — параметр длительности радиолокационного сигнала.

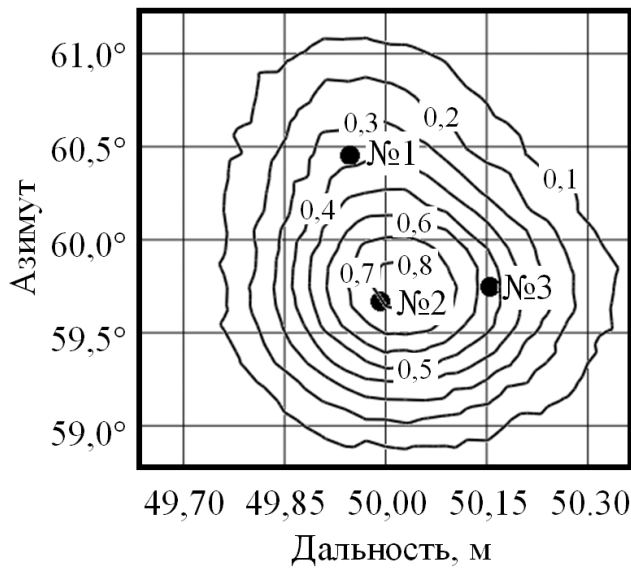
Характеристика диаграммы направленности определяется следующим выражением:

$$f_A(\varphi) = \sum_{k=-1}^1 (23/54)^k \cdot \text{sinc}[\pi(\varphi/\theta_A - k)], \quad (20)$$

где $\theta_A = 1^\circ$ — ширина диаграммы направленности антенны в азимутальной плоскости, соответствующая апертуре антенны 1,5 м.

На рис. 3 представлены полученные положения центров рассеяния на контурных картах амплитудного и фазового распределений радиолокационного изображения. При сравнении этих положений с исходными параметрами центров рассеяния наблюдаются отклонения, связанные с действием шума и ограниченным количеством дискретных точек радиолокационного изображения. Из рисунка хорошо видно, что предлагаемый алгоритм позволяет оценить положения центров рассеяния, находящихся в пределах общего амплитудного всплеска комплексного радиолокационного изображения. Таким образом, с использованием алгоритма оценки параметров точечных центров рассеяния радиолокационных объектов в частотной области может быть увеличена точность определения координат точечных рассеивателей объекта в сверхкороткоимпульсной радиолокации.

Амплитудное распределение



Фазовое распределение

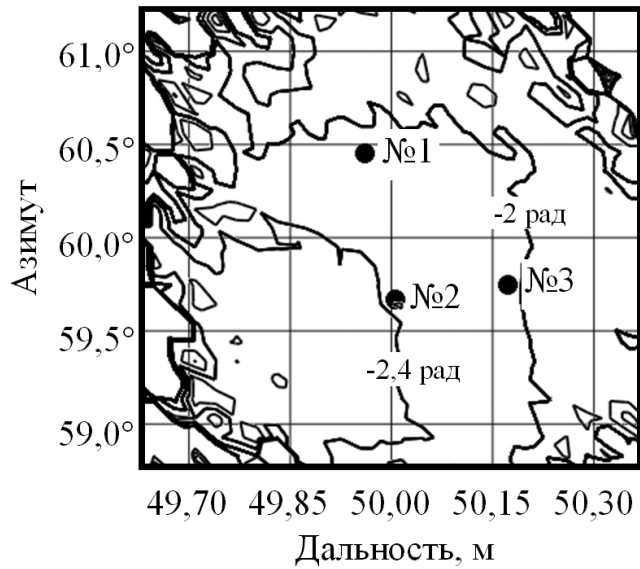


Рис. 3. Карта уровней радиолокационного изображения трехточечной цели и отмеченные точками вычисленные положения центров рассеяния

Выводы

Статья посвящена методу оценивания параметров многоточечных целей в сверхкороткоимпульсной радиолокации по спектру радиолокационного изображения. В работе представлены результаты компьютерного моделирования сигналов, рассеянных радиолокационным объектом, описываемым совокупностью «блестящих» точек. Компьютерная модель учитывает форму излучаемых радиолокационных импульсов и диаграмму направленности антенной системы.

Для определения координат центров рассеяния объекта используется алгоритм идентификации параметров модели радиолокационного изображения в частотной области. Полученные в результате идентификации параметры модели принимаемого радиолокационного сигнала могут рассматриваться как характеристики 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.

Библиографический список

1. Taylor, James D. Ultra-Wideband Radar Technology / editor Taylor, James D., CRC Press, 2000.
2. K.M. Cuomo, J.E. Piu, and J.T. Mayhan. Ultra-Wideband Coherent Processing, Linc. Lab. J. 10 (2) 1997, pp. 203-221.

3. Коновалюк М.А., Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Скосырев В.Н. Применение параметрической идентификации в сверхкороткоимпульсной радиолокации», 9-я Международная научно-техническая конференция и выставка «Цифровая обработка сигналов и ее применение — DSPA-2007», Москва, ИПУ РАН, март 2007 г.

4. 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.

5. M. 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.

6. August W. Rihaczek, Stephen J. Hershkowitz. Theory and practice of radar target identification, Artech House, 2000.

7. Thomas G. Moore, Brian W. Zuerndorfer, and Earl C. Burt. Enhanced Imagery Using Spectral-Estimation-Based Techniques, Lincoln Laboratory Journal, vol. 10, N 2, pp. 171-186, 1997.

8. Sarkar T.K., Pereira O. Using the Matrix Pencil Method to Estimate the Parameters of a Sum of Complex Exponentials, IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 37, No. 1, pp. 48-55, February 1995.