621.396.967

Применение вейвлет-преобразований для определения локальных эффективных поверхностей рассеяния объектов сложной геометрической формы в сверхширокой полосе частот

Р. В. АНТИПЕНСКИЙ, В. В. БОНДАРЕНКО, О. Е. КИРЬЯНОВ, А. П. ЛЮБАВСКИЙ

Военный авиационный инженерный университет Минобороны России, Воронеж, Россия, e-mail: antbc@vmail.ru

Описан способ определения в сверхширокой полосе частот локальных эффективных поверхностей рассеяния объектов сложной геометрической формы при помощи вейвлет-обработки отраженных нестационарных сигналов, полученных в процессе измерений радиолокационных характеристик объекта в случае воздействия сверхкоротких импульсов.

Ключевые слова: *локальная эффективная поверхность рассеяния, сложная геометрическая форма, сверхширокая полоса частот, вейвлет-преобразование, локальный энергетический частотный спектр.*

The effective method of determination of local radar cross section of object with complex geometrical form in ultrawide frequency band by means of wavelet-processing of the reflected non-stationary signals received in the course of measurements of radar-tracking characteristics of object at influence of ultrashort pulses is described.

Key words: *local radar cross section, complex geometrical form, ultrawide frequency band, wavelet-transformation, local power frequency spectrum.*

Физические основы построения и принципы функционирования радиолокационных измерительных устройств, использующих сверхкороткие импульсы (СКИ), можно отнести к наиболее актуальным и, вместе с тем, проблемным вопросам современной измерительной техники. Развитие радиолокационной техники в конце прошлого века претерпело качественный скачок в связи с разработкой и внедрением широкополосных систем. В дальнейшем произошел переход к сверхширокополосной (СШП) СКИ-локации, когда в направлении цели излучается последовательность сверхкоротких видеоимпульсов без несущей частоты, и отраженный нестационарный сигнал анализируется в диапазоне частот от единиц мегагерц до десятков гигагерц. Информативность измерительного радара при использовании СШП СКИ-сигналов повышается благодаря уменьшению импульсного объема по дальности. Измерительные радиолокационные системы, работающие с такими сигналами, имеют следующие преимущества: высокое пространственное разрешение, простота извлечения информации о цели из отраженного сигнала и повышенная помехозащищенность от паразитных отражений от стен помещений или безэховой камеры за счет временной селекции отраженного от цели сигнала.

В результате электромагнитного взаимодействия зондирующего СШП СКИ-сигнала с поверхностью радиолокационного объекта формируется рассеянное электромагнитное поле, часть которого распространяется в направлении приемной антенны. Поочередно отражаясь от отдельных вторичных излучателей исследуемого объекта, СШП-сигнал образует импульсную последовательность, параметры которой (число, задержка и интенсивность импульсов) зависят от геометрии и ракурса объекта, а также от импульсных характеристик отражательных элементов. Отраженный нестационарный сигнал несет информацию об объекте, которую невозможно выделить традиционными способами обработки, используемыми для узкополосных стационарных сигналов, и, в частности, фурье-преобразованием. Извлечение информации о размерах и форме радиолокационных объектов в виде радиолокационных характеристик (РЛХ) до сих пор относится к числу задач, требующих решения как в научном, так и в практическом плане при разработке мер по снижению радиолокационной заметности исследуемых радиолокационных целей.

Ниже описан способ определения в сверхширокой полосе частот локальных эффективных поверхностей рассеяния (ЭПР) объектов сложной произвольной геометрической формы на основе применения частотно-временного анализа при обработке нестационарного сигнала, отраженного от цели, при помощи вейвлет-преобразования. Способ отличается повышенной точностью измерения локальных ЭПР объектов благодаря предварительному определению центров рассеяния («блестящих точек») локальных энергетических частотных спектров исследуемого объекта, а также повышенной пространственно-временной разрешающей способностью. Это обеспечивает возможность селекции отраженных сигналов, рассеянных объектом и источниками отражений от стен помещения и подстилающей поверхности, за счет выделения нужной части отраженного от цели сигнала с применением временного стробирования.

Исследования последних лет позволили найти решения ряда важнейших задач СШП СКИ-радиолокации, таких как формирование, прием электромагнитных полей и нестационарные обратные электродинамические задачи. Методы пространственно-временной обработки сигналов, рассеянных целью, позволили измерить локальные РЛХ. Усовершенствование математического аппарата, используемого для описания рассеивающих свойств радиолокационных целей, было связано с необходимостью учитывать сложный спектральный состав зондирующих сигналов комплексов современных СШП СКИ радиолокационных систем и нестационарный характер рассеяния электромагнитных волн целями при облучении их короткими импульсами, имеющими сверхширокополосный частотный спектр. Это обстоятельство и повлекло за собой необходимость описания рассеивающих свойств целей с использованием импульсных характеристик. Согласно теории нестационарного рассеяния электромагнитных волн при проведении измерений на таком комплексе принимаемый отраженный сигнал во временной области задается последовательностью сверток импульсных характеристик элементов измерительного радиолокационного канала, цели и сигнала импульсного генератора

$$u(t) = h(t)_{изм} \otimes h(t) \otimes e(t), \qquad (1)$$

где $u(t)$ — принимаемый отраженный сигнал на выходе стробоскопического осциллографа; $h(t)_{изм}$, $h(t)$ — импульсные характеристики измерительного тракта и пространства распространения; $e(t)$ — зондирующий импульсный сигнал генератора; $\otimes$ — операция математической свертки.

Уравнение (1) связывает параметры зондирующего $e(t)$ и принимаемого $u(t)$ сигналов при их любой широкополосности. Отраженный сигнал $u(t)$ на выходе стробоскопического осциллографа кроме информации об измеряемом объекте содержит информацию об измерительном тракте и форме сигнала $e(t)$, подаваемого с генератора на передающую антенну. Цель рассматривается как независимый элемент радиолокационного канала, преобразующие свойства которого можно описать совокупностью РЛХ. Разработка и внедрение СШП-систем в радиолокационную измерительную технику позволяет на более высоком уровне решать такие задачи радиолокационного наблюдения, как обнаружение и распознавание целей, построение их радиолокационных изображений. При этом важную роль играет не только большая абсолютная ширина спектра СШП-сигнала, достигающая десятков гигагерц, но и его значительная относительная широкополосность $\Delta f/f_0$, где Δf — ширина спектра; f_0 — центральная частота.

Отказ от традиционного представления радиотехники — узкополосности зондирующих сигналов — приводит к необходимости пересмотра многих основополагающих концепций радиолокационной измерительной техники, начиная с принципов излучения, приема и обработки сигналов, анализа рассеяния сигналов целями и заканчивая математическими методами анализа и синтеза радиолокационных измерительных комплексов (РЛИК). Решение задач радиолокационного наблюдения связано с анализом изменений формы сигналов при излучении, рассеянии и приеме, что требует соответствующего математического аппарата при решении нестационарных электродинамических задач, связанных с применением СШП зондирующих сигналов. Использование частотно-временных методов, в первую очередь, методов получения решений во временной области, позволило установить, что основной вклад в рассеянное целью поле вносят отдельные локальные центры рассеяния, временное расположение и частотные свойства которых определяются геометрией рассматриваемой электродинамической структуры и видом СШП СКИ-сигнала.

Разработка принципа пространственно-временной эквивалентности позволила рассматривать цель и антенные системы как обобщенные фильтры, характеристики которых определяются пространственной структурой объекта и временной структурой сигнала. Выявление фундаментальной связи между импульсной характеристикой рассеяния объекта и его формой, размерами и ориентацией позволило на качественно новом уровне ставить и решать обратную задачу рассеяния: определять параметры объекта по измеренному отраженному полю. По мере увеличения ширины спектра Δf зондирующего импульсного сигнала возникает возможность временного разрешения откликов отдельных рассеивающих центров («блестящих точек») объекта сложной формы. В таких условиях радиолокационная измерительная система обеспечивает получение локальных РЛХ, поскольку имеется возможность сопоставлять отдельные элементы отраженного радиолокационного сигнала с конкретными элементами цели сложной формы. Особенности таких РЛХ проявляются в зависимости формы (временной структуры) рассеянных сигналов от угловых координат, поскольку при высоком разрешении РЛИК по дальности отклики отдельных рассеивающих центров объекта имеют временные запаздывания, зависящие от ракурса цели. При использовании СШП СКИ-сигналов, у которых $\Delta f/f_0 \approx 1$, достигается точность и разрешающая способность РЛИК, оцениваемая длиной волны средней частоты f_0. Характеристики целей и элементов РЛИК, адекватные применению СШП СКИ-сигналов, должны описывать свойства объектов в максимально широком диапазоне частот, а в монохроматическом случае совпадать с традиционным узкополосным описанием. Таким образом, СШП РЛХ являются обобщенными характеристиками радиолокационных объектов.

Для измерений локальных ЭПР использовали лабораторный СШП РЛИК с ударным возбуждением передающей антенны последовательностью СКИ амплитудой 50 В, длительностью 30 пс с частотой следования 3 МГц. По определению импульсная характеристика — это реакция измерительной системы на δ-импульс, т. е. импульс с бесконечной полосой частот. На практике исследователь использует импульсы, имеющие ограниченный частотный спектр, и может оценивать только сглаженную характеристику, ширина полосы частот которой определяется спектром зондирующего импульса и параметрами приемопередающего тракта измерительной радиолокационной установки. Основные технические характеристики СШП РЛИК приведены в [1, 2]. В состав комплекса входят: генератор TMG 050 030 VP 11; стробоскопический осциллограф TMR 8140; ПЭВМ; интерфейс RS-232, связывающий на программно-функциональном уровне блоки комплекса; приемная и передающая антенны П6-23М; опорно-поворотное устройство (ОПУ), управляемое ПЭВМ. Измерения проводили при вертикальной поляризации поля и бистатическом угле падения (отражения) электромагнитной волны $\theta = 3°$. Для калибровки СШП РЛИК при вычислениях ЭПР применяли модельный объект — ме-

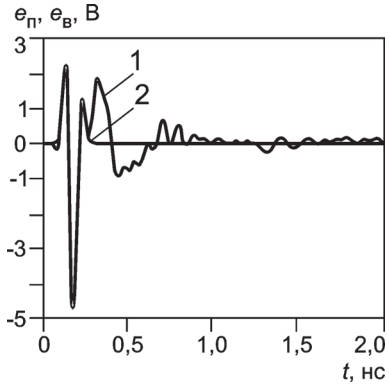

Рис. 1. Временные зависимости зондирующего сигнала $e_п(t)$ в точке облучения объекта (*1*) и реальной части аппроксимирующего комплексного вейвлета Морле $e_в(t)$ (*2*)

таллическую сферу диаметром 142 мм с известной ЭПР на определенных частотах [3, 4]. В случае калибровки отраженный сигнал $u(t)$ на выходе стробоскопического осциллографа согласно (1) кроме информации об импульсной характеристике $h(t)$ модельного объекта содержит информацию об измерительном тракте и форме сигнала $e(t)$ с выхода генератора, поэтому выбор базисной вейвлет-функции осуществляется с учетом этих параметров. Для использования в дальнейших вычислениях измеряли временную зависимость зондирующего поля $e(t)$ в зоне облучения объекта. Короткий импульс, в котором заключена наибольшая энергия зондирующего сигнала (рис. 1, кривая *1*) в точке облучения объекта, был оцифрован с максимальным числом отсчетов $N = 2048$. Отсчеты $k = \overline{0, N-1}$ временной зависимости $e(t)$, как показано на рис. 1, аппроксимировали методом наложения при помощи программы «MathCad» реальной частью специально подобранного комплексного вейвлета Морле так, чтобы их частотные спектры совпадали в максимально широкой полосе рабочих частот с минимально возможной невязкой. Математическая запись такого вейвлета имеет вид [5]:

$$\text{morlet}\,(k) = e^{iwk}\, e^{-(k/z)^2},$$

где $w = 3{,}7$; $z = 0{,}8$ — найденные параметры аппроксимирующего вейвлета.

В базисе этого вейвлета с параметрами w и z в дальнейшем проводили анализ отраженного от объекта сигнала.

Под временной характеристикой рассеяния принято понимать импульсную характеристику объекта, которая является реакцией на электромагнитное возбуждение, имеющее форму и свойства δ-функции. Частотной характеристикой рассеяния объекта служит интегральная ЭПР. Если частота f зондирующего электромагнитного поля изменяется или облучение проводится полем, обладающим энергетическим спектром $G^2_п(f)$, то измеряют энергетический спектр рассеянного поля $G^2_р(f)$ и получают зависимость ЭПР от частоты f, называемую интегральной ЭПР:

$$\sigma(f) = 4\pi R^2 G^2_р(f)\,/\,G^2_п(f), \qquad (2)$$

где множитель $4\pi R^2$ вводится для компенсации затухания рассеянного поля в зоне измерения; R — расстояние до объекта.

Интегральные энергетические спектры радиолокационных объектов, рассчитанные фурье-преобразованием временного отклика отраженного от цели сигнала, не позволяют находить локальные ЭПР объекта, так как в них отсутствует информация о взаимном расположении во времени гармоник, образующих импульсный отклик цели на нестационарное возбуждение. При этом локальность ЭПР подразумевает возможность представления отраженного от объекта сигнала сложной формы суперпозицией импульсных характеристик его отдельных элементов (центров рассеяния), обоснованного линейностью как измерительной системы, так и процесса отражения от объекта. Возможность декомпозиции импульсной характеристики является основанием для моделирования ЭПР объекта сложной формы суперпозицией локальных ЭПР элементарных объектов, которые можно определить по (2) при условии использования в числителе формул локальных энергетических частотных спектров — откликов от «блестящих точек» объекта. Зависимость локальной ЭПР от частоты (отношение локального энергетического частотного спектра к интегральному энергетическому спектру падающего поля) называют локальной ЭПР радиолокационного объекта $\sigma_{лок\,j}(f)$. С точки зрения СШП-радиолокации, очень важную роль играет зависимость ЭПР от частоты или длины волны электромагнитного поля. Эффективную поверхность рассеяния определяют теоретически путем расчета поля, рассеянного объектом данной формы, в за-

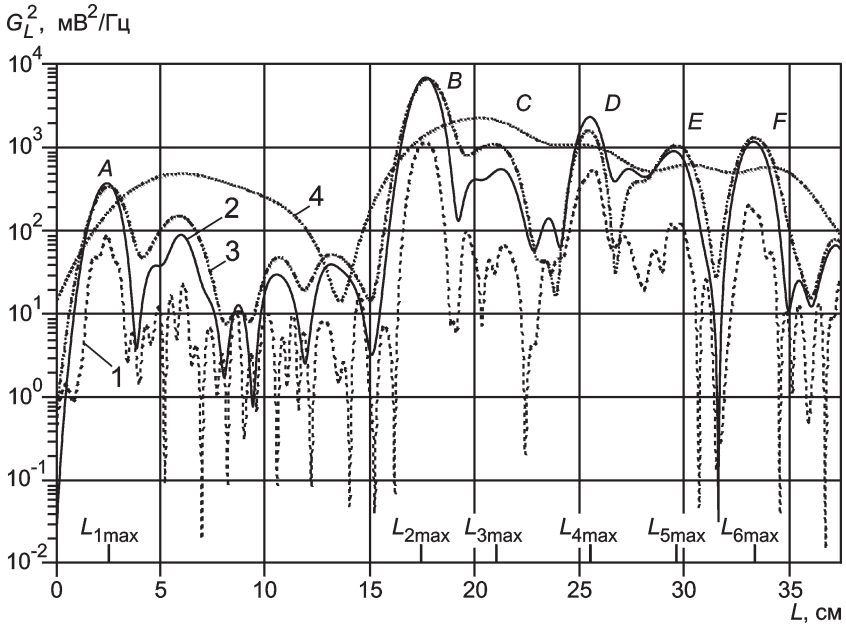

Рис. 2. Энергетические вейвлет-спектры G^2_{Lj} отраженного сигнала $u(t)$ в зависимости от координаты по дальности L при разных значениях параметра масштаба a и соответствующих частотах:

1 – $a = 20$, $f_1 = 17{,}868$ ГГц; *2* – $a = 60$, $f_2 = 7{,}445$ ГГц; *3* – $a = 80$, $f_3 = 5{,}584$ ГГц; *4* – $a = 200$, $f_4 = 2{,}233$ ГГц; *A*, ..., *F* — «блестящие точки»

висимости от ракурса и длины волны гармонического поля (стационарный случай) либо путем нахождения импульсной характеристики цели, т. е. вычислением поля, рассеянного объектом при воздействии бесконечно короткого импульса напряженности электрического поля, несущего конечную энергию (нестационарный случай). Вместе с тем последняя характеристика является более удобной формой отображения спектральных свойств объекта локации в широкой полосе частот и содержит одновременно амплитудно- и фазочастотную информацию об объекте. Оба подхода рассмотрены в [1—4] для тел правильной геометрической формы: пластины, сферы. Для цели, представляющей более сложный геометрический объект, экспериментально получали частотные зависимости интегральной и локальных ЭПР в следующей последовательности.

С учетом параметров масштаба a и сдвига b базовую вейвлет-функцию можно представить в виде

$$\psi(a, b, k) = a^{-1/2}\,\text{morlet}\,[(b - k)/a]. \qquad (3)$$

При обработке всех полученных в эксперименте сигналов использовали время дискретизации t_k = 0,001221 нс; $a = \overline{1, 400}$, $b = \overline{0, N-1}$; расстояние по дальности $L = 15 t_k b_k$; временное окно $T_k = t_k(N - 1)$. Далее, чтобы найти локальные энергетические частотные спектры центров рассеяния, выполняется прямое времячастотное вейвлет-преобразование отраженного сигнала при использовании k отсчетов с учетом условия $u(k) \sim u(t)$. Базовой служит вейвлет-функция $\psi(a, b, k)$ с ранее определенными параметрами w = 3,7; z = 0,8. Разложение проводится по формуле

$$c(a, b) = \sum_{k=0}^{N-1} u(k)\,\psi(a, b, k). \qquad (4)$$

Так как форма базисных функций $\psi(a, b, k)$ зафиксирована, вся информация об исследуемом сигнале $u(k)$ переносится на значения вейвлет-коэффициентов $c(a, b)$. Семейство энергетических вейвлет-спектров коэффициентов $c(a, b)$, соответствующих отраженному сигналу $u(t) \sim u(k)$ в зависимости от значений параметров a и b, вычисляется как

$$G^2(a, b) = |c(a, b)|^2 \qquad (5)$$

и является двухмерным массивом амплитуд — значений вейвлет-коэффициентов $|c(a, b)|^2$. Распределение этих значений в пространстве (a, b) дает информацию об изменении относительного вклада вейвлет-компонентов разного масштаба a в зависимости от параметра сдвига b. Локальные энергетические вейвлет-спектры $G^2_{Lj}(L)$ отраженного сигнала при разных значениях a и, как следствие, при разных частотах $f_1, ..., f_4$ приведены на рис. 2.

Из анализа рис. 2 следует, что с повышением частоты «дальностный портрет» (радиолокационное изображение) объекта изменяется и приобретает детализацию. На частоте f_4 = 2,233 ГГц проявляется только контур объекта, а при f_1 = 17,868 ГГц различимы даже мелкие отражающие центры. Уровень отраженного сигнала с изменением частоты также меняется и становится наибольшим при частотах от f_2 = 7,445 ГГц до f_3 = 5,584 ГГц. В соответствии с рис. 2 и вычислениями по (3) — (5) были получены параметры вейвлет-преобразования $a_{j\,\max}$, $b_{j\,\max}$; временные координаты $t_{k\,j\,\max}$; координаты по дальности $L_{j\,\max}$ и центральные частоты коррелирующих вейвлетов $f_{0\,j\,\max}$ наиболее интенсивных j-х «блестящих точек» A, B, C, D, E, F исследуемого объекта, $j = \overline{1, 6}$. Эти данные приведены в таблице.

Параметры «блестящих точек» A, ... , F ($j = \overline{1, 6}$)

Параметр	Значение параметра в «блестящей точке»					
	A	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*
$a_{j\,\max}$	65	65	260	55	78	90
$b_{j\,\max}$	140	960	1150	1390	1620	1820
$t_{k\,j\,\max}$, нс	0,171	1,172	1,404	1,697	1,978	2,222
$L_{j\,\max}$, см	2,6	17,6	21,1	25,5	29,7	33,4
$f_{0\,j\,\max}$, ГГц	6,872	6,872	1,718	8,122	5,727	4,963

Любой локальный энергетический частотный спектр $G^2_{Lj}(f, b_{j\max})$ для фиксированного значения $b_{j\,\max}$, соответствующего временному расположению $t_{k\,\max}$ или расположению по дальности $L_{b\,j\,\max}$ каждой j-й «блестящей точки», определяют при замене переменной масштаба a на переменную f (частоту) по формуле

$$f = a_{j\,\max} f_{0\,j\,\max} / a,$$

где $a_{j\,\max}$ — параметр масштаба a для максимального значения $G^2_{Lj}(a, b)_{\max}$ энергетического вейвлет-спектра j-й «блестящей точки», соответствующей значению $b_{j\,\max}$; $f_{0\,j\,\max}$ — частота отраженной энергии «блестящей точки», соответствующая $G^2_{Lj}(f, b_{j\max})$.

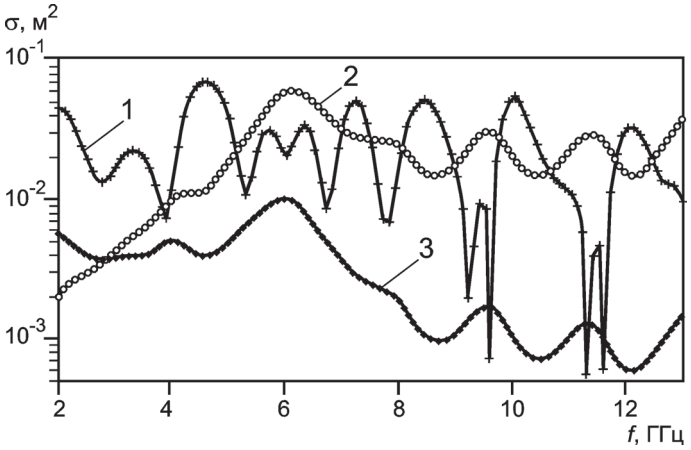

Рис. 3. Частотные зависимости ЭПР объекта локации сложной геометрической формы:

1 — интегральная; *2*, *3* — локальные «блестящих точек» *B* и *C* (см. рис. 2)

Частоту $f_{0\,j\,\max}$ определяют с помощью коррелирующего вейвлета $\psi(a, b, k)$ с найденными ранее параметрами w = 3,7 и z = 0,8 при $a_{j\,\max}$, $b_{j\,\max}$; эта частота является его центральной вейвлет-частотой. Формула для вычисления $G^2_{Lj}(f)$ для любого b_j (в частности, для максимального значения $G^2_{Lj}(f, b_{j\max})$) имеет вид

$$G^2_{Lj}(f) = \left|c(f, b_j)\right|^2,$$

где $c(f, b_j)$ — вейвлет-коэффициенты при фиксированном значении b_j.

Зависимости $G^2_{Lj}(f, b_{j\max})$ для каждой «блестящей точки» A, ..., F исследуемого объекта, отображающие распределение отраженной энергии по частоте для каждого конкретно выбранного сечения объекта по дальности в полосе частот 2 — 13 ГГц, рассчитаны в соответствии с методикой [3].

Интегральная $\sigma(f)$ и локальные $\sigma_{\text{лок}\,j}(f)$ ЭПР наиболее характерных «блестящих точек» B, C исследуемого объекта получены из отношения интегрального $G^2_{\text{р}}(f)$ и локальных $G^2_{Lj}(f)$ спектров к энергетическому спектру падающего поля $G^2_{\text{п}}(f)$ на основании (2) и показаны на рис. 3. Результаты этих измерений находятся в соответствии с физической картиной процесса отражения и распространения электромагнитных волн вдоль протяженных по дальности объектов. Если представить отклик отраженного от объекта сигнала при распространении электромагнитных волн как последовательность элементарных отсчетов дискретными отрезками времени t_j, то каждый из этих отрезков будет соответствовать j-му поперечному сечению объекта, перпендикулярному прямому и обратному направлениям распространения волн. Эти сечения объекта по дальности L_j можно представить в виде набора частотных фильтров, работающих на пропускание отраженного сигнала со сверхширокой полосой. Наиболее прозрачные фильтры, пропускающие отраженный сигнал с малыми потерями, можно рассматривать в качестве «блестящих точек» объекта со своими РЛХ. Частотная характеристика каждого такого фильтра соответствует СШП локальной ЭПР «блестящей точки».

Предложенным способом измерения локальных СШП РЛХ объектов с применением вейвлет-преобразований можно исследовать радиолокационную заметность объектов специального назначения. Методика позволяет эффективно уменьшить радиолокационную заметность как при выборе конструктивных особенностей формы объекта (пространственной конфигурации), так и при направленном использовании современных радиопоглощающих покрытий с наиболее подходящими электрофизическими свойствами для уменьшения отражательной способности того или иного центра рассеяния объекта в сверхширокой полосе частот. При временной локализации отраженного сигнала от стен помещения и подстилающей поверхности способ эффективен в исследованиях уменьшенных и крупномасштабных макетов объектов сложной геометрической формы даже при отсутствии безэховых экранированных камер.

Литература

1. **Пат. 2321007 РФ.** Способ измерения локальных энергетических частотных спектров и коэффициента отражения радиопоглощающего материала / В. В. Бондаренко, А. А. Гаврилов, В. Е. Забалуев // Изобретения. Полезные модели. 2008. № 9.

2. **Бондаренко В. В., Демчило И. Т., Павлюченко О. В.** Применение вейвлет-преобразований для измерения угловой зависимости коэффициента отражения радиопоглощающих покрытий в сверхширокой полосе частоты // Метрология. 2008. № 3. С. 22—30.

3. **Бондаренко В. В., Кыштымов Г. А.** Применение вейвлет-преобразований для измерения локальных эффективных поверхностей рассеяния сферы в сверхширокой полосе частот // Измерительная техника. 2008. № 8. С. 48—51; **Bondarenko V. V., Kyshtymov G. A.** The use of wavelet transformations to measure the local effective scattering cross sections of a sphere in a superbroad frequency band // Measurement Techniques. 2008. V. 51. N 8. P. 882—886.

4. **Кобак В. О.** Радиолокационные отражатели. М.: Сов. радио, 1975.

5. **Малла С.** Вейвлеты в обработке сигналов / Пер. с англ. М.: Мир, 2005.

Дата принятия 22.08.2012 г.