

Применение вейвлет-преобразований для анализа рассеяния сверхширокополосных сигналов объектами сложной формы

Р.В. Антипенский, А.П. Любавский, С.Н. Разиньков

ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
394064, Российская Федерация, г. Воронеж
ул. Старых Большевиков, 54а

На основе измерения мгновенных амплитуд, выполненного стробоскопическим методом на дискретных интервалах времени, и вейвлет-преобразований отраженных сигналов исследованы интегральная и локальные эффективные поверхности рассеяния объекта сложной формы, облучаемого сверхширокополосным импульсом. Проведен анализ частотных зависимостей энергетических спектров и определены параметры вейвлет-преобразований для выявления доминирующих центров вторичного излучения объекта.

Ключевые слова: сверхширокополосный сигнал, локальная эффективная поверхность рассеяния, вейвлет-преобразование, энергетический вейвлет-спектр сигнала.

Анализ рассеяния сверхширокополосных (СШП) сигналов объектами сложной формы имеет значение для разработки средств снижения контрастности радиолокационных целей и совершенствования способов передачи информации по локальным сетям радиосвязи и управления в условиях сложного рельефа местности и городской застройки [1].

Вторичное излучение объекта, в основном, формируется полями, рассеянными отдельными участками его поверхности с доминирующими отражательными свойствами. По мере увеличения эквивалентной ширины спектра сигнала возрастает эффективность разрешения локальных рассеивателей по времени запаздывания откликов, зависящего от ракурса облучения [1; 2]. За счет различия интенсивности вторичного излучения отдельных элементов обеспечивается стабилизация положений энергетических центров объектов [3].

В предлагаемой работе на основе измерений мгновенных амплитуд, выполненных стробоскопическим методом на дискретных интервалах времени [2], и вейвлет-преобразований [4] отраженных сигналов исследованы интегральная эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) и локальные ЭПР объекта сложной формы.

Цель работы – анализ частотных зависимостей интегральной и локальных ЭПР объекта и определение параметров вейвлет-преобразований для выявления доминирующих центров вторичного излучения СШП сигнала.

Согласно [1], распределение отраженного сигнала во временной области $u(t)$ находится путем последовательной свертки облучающего сигнала $e(t)$ с импульсными характеристиками среды распространения и объекта [1; 2].

Интегральная ЭПР объекта на текущей частоте в спектре сигнала f определяется выражением [5]

$$\sigma(f) = 4\pi R \frac{G^2(f)}{G_0^2(f)}, \quad (1)$$

где $G_0^2(f)$ и $G^2(f)$ – энергетические спектры облучающего и отраженного сигналов; R – расстояние до точки регистрации отраженного сигнала в дальней зоне объекта, граница которой определяется как отношение удвоенного значения квадрата его характерного размера к эквивалентной пространственной длительности сигнала [5].

Локальные ЭПР объекта $\sigma_{Lj}(f)$, $j = 1, 2, \dots$, определяются с использованием (1) при замене $G^2(f)$ энергетическими спектрами $G_{Lj}^2(f)$ откликов локальных центров вторичного излучения [6; 7].

Внешний вид исследуемого объекта сложной формы, состоящего из элементарных отражателей с высоким уровнем вторичного излучения в различных секторах углов [8], представлен на рис. 1.

При измерениях ЭПР объект облучался коротким СШП импульсом, зависимость которого

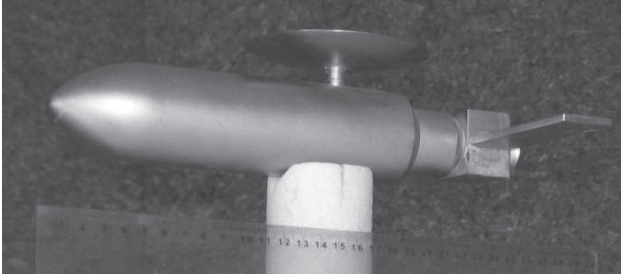


Рис. 1. Объект сложной формы

от времени приведена на рис. 2 под номером 1; отраженные сигналы подвергались когерентному накоплению, их энергетические спектры вычислялись на основе быстрого преобразования Фурье.

В [6] показано, что используемый сигнал в точке облучения объекта на множестве N дискретных отсчетов по времени $e(t) \approx e(k)$, $k = 0, \dots, N - 1$, может быть аппроксимирован реальной частью комплексного вейвлета Морле [4]

$$\text{morlet}(k) = \exp \left[-\left(\frac{k}{z} \right)^2 + iwk \right] \quad (2)$$

с параметрами $w = 3,7$ и $z = 0,8$, выбранными из условия минимизации невязки спектров в максимально широкой полосе рабочих частот.

С учетом параметров масштаба « a » и сдвига « b » [4] базисная вейвлет-функция может быть представлена в виде

$$\Psi(a, b, k) = a^{-1/2} \text{morlet} \left[\frac{b - k}{a} \right]. \quad (3)$$

Для нахождения локальных энергетических частотных спектров центров рассеяния выполняется прямое вейвлет-преобразование отраженного сигнала в приближении $u(t) \approx u(k)$, $k = 0, \dots, N - 1$,

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

Семейство вейвлет-спектров коэффициентов $c(a, b)$ представляется в виде двумерного масштаба

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

содержащего информацию об изменении относительного вклада вейвлет-коэффициентов различного масштаба « a » в зависимости от параметра сдвига « b ».

Обработка сигнала $u(t)$ осуществлялась при следующих условиях:

– время дискретизации сигнала $\Delta t_k = 0,001221$ нс;

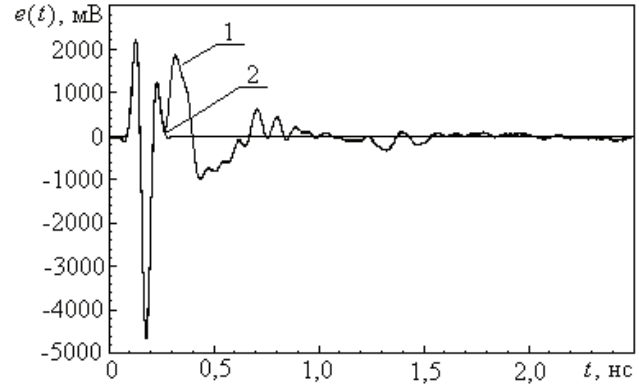


Рис. 2. Сигнал в точке облучения (зависимость 1) и реальная часть аппроксимирующего комплексного вейвлета Морле (зависимость 2)

– диапазон изменения параметра масштаба вейвлета $a = 1 \div 400$;

– диапазон изменения параметра сдвига вейвлета $b = 0 \div N - 1$;

– расстояние между центрами вторичного излучения $L_b = 15 \Delta t_k b_k$;

– время регистрации отраженных от них сигналов $t_k = \Delta t_k b_k$.

Локальный энергетический спектр $G_{Lj}^2(f, b_{j\max})$ для фиксированного значения $b_{j\max}$, соответствующему моменту времени $t_{k\max}$ или дальности $L_{bj\max}$, j -го центра вторичного излучения, $j = 1, 2, \dots$, определяется из (5) путем замены переменной масштаба « a » на текущее значение частоты f

$$f = a^{-1} a_{j\max} f_{0j\max}, \quad (6)$$

где $a_{j\max}$ – значение параметра масштаба « a » для максимального значения энергетического вейвлет-спектра j -го центра, соответствующего значению $b_{j\max}$; $f_{0j\max}$ – частота отраженного сигнала, соответствующая максимальному значению локального энергетического спектра $G_{Lj}^2(f, b_{j\max})$. Значение $f_{0j\max}$ находится с использованием коррелирующей вейвлет-функции (3) при $a_{j\max}$, $b_{j\max}$ и является его центральной вейвлет-частотой. Из (6) следует, что выражение для определения локального энергетического частотного спектра $G_{Lj}^2(f)$ при произвольной величине $b_{j\max}$, $j = 1, 2, \dots$, имеет вид

$$G_{Lj}^2(f) = |c(f, b_j)|^2. \quad (7)$$

На рис. 3 представлены зависимости энергетических вейвлет-спектров $G_{Li}^2(L_b)$ от дальности L_b при различных значениях параметра масштаба « a ».

Из них следует, что с повышением частоты облучающего сигнала изображение объекта приобретает более детальный характер. На ча-

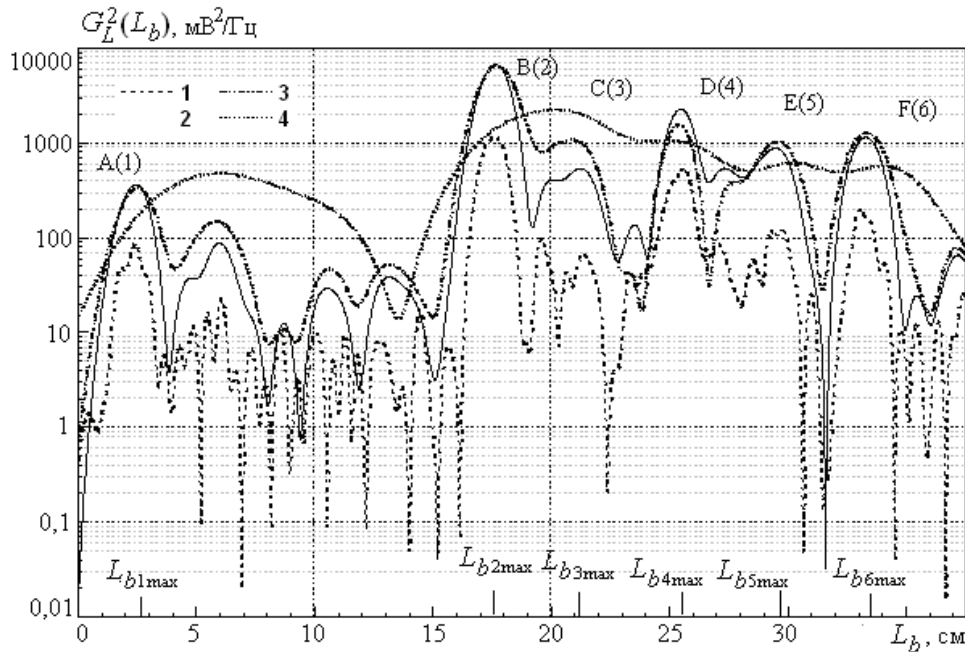


Рис. 3. Зависимости энергетических вейвлет-спектров $G_{L_j}^2(L_b)$ отраженного сигнала от дальности L_b при различных значениях параметра масштаба (1 - $a = 20$ (частота $f_1 = 17,868$ ГГц); 2 - $a = 60$ (частота $f_2 = 7,445$ ГГц); 3 - $a = 80$ (частота $f_3 = 5,584$ ГГц); 4 - $a = 200$ (частота $f_4 = 2,233$ ГГц))

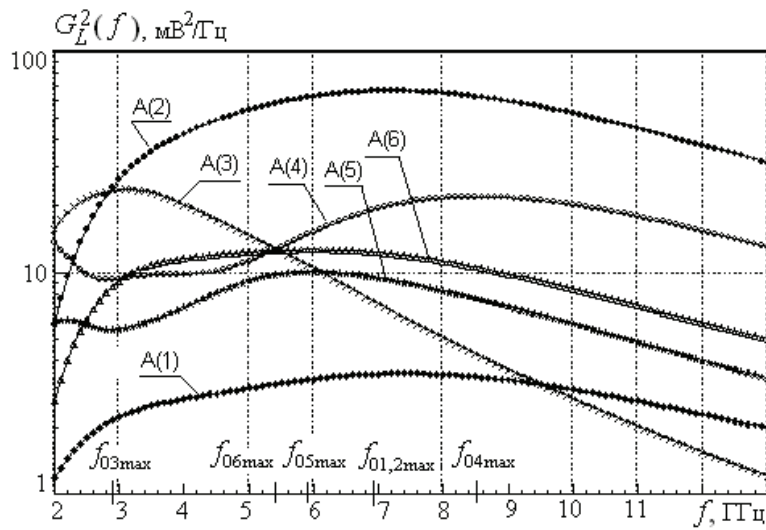


Рис. 4. Зависимости локальных энергетических спектров $G_{L_i}^2(L_b)$ центров вторичного излучения объекта от текущего значения частоты сигнала

Таблица
Параметры центров вторичного излучения объекта

| Наименование параметра | Значение параметра | | | | | |
|------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $L_{bj\max}$, см | 2,6 | 17,6 | 21,1 | 25,5 | 29,7 | 33,4 |
| $t_{kj\max}$, нс | 0,171 | 1,172 | 1,404 | 1,697 | 1,978 | 2,222 |
| $a_{j\max}$ | 65 | 65 | 260 | 55 | 78 | 90 |
| $f_{0j\max}$, ГГц | 6,872 | 6,872 | 1,718 | 8,122 | 5,727 | 4,963 |
| $b_{j\max}$ | 140 | 960 | 1150 | 1390 | 1620 | 1820 |

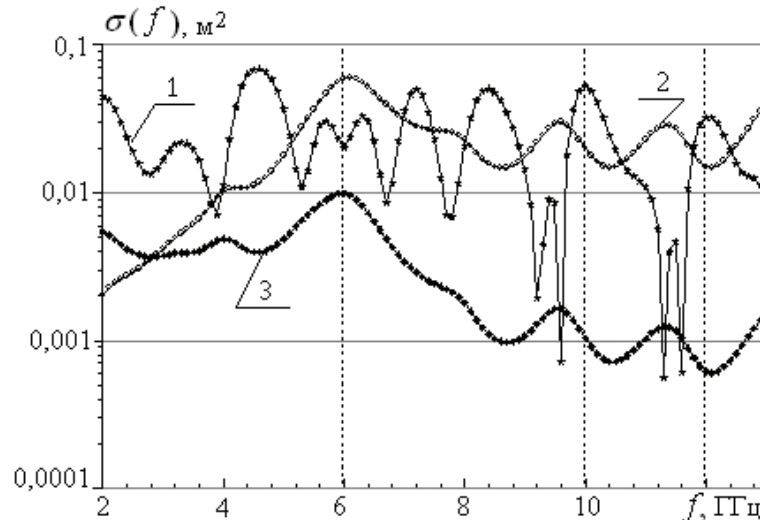


Рис. 5. Частотные зависимости ЭПР объекта сложной геометрической формы (1 – интегральная ЭПР; 2 и 3 – локальные ЭПР доминирующих центров вторичного излучения В(2) и С (3))

стоте $f_4 = 2,233$ ГГц проявляется только контур объекта, на частоте $f_1 = 17,868$ ГГц различимы даже мелкие отражающие центры. Уровень отраженного сигнала достигает наибольших значений в окрестностях частот $f_2 = 7,445$ ГГц и $f_3 = 5,584$ ГГц, где проявляются наиболее интенсивные центры отражений.

В таблице приведены найденные на основе указанных зависимостей и (3)–(5) параметры вейвлет-преобразования $a_{j\max}$, $b_{j\max}$, временные координаты $t_{kj\max}$, координаты дальности $L_{bj\max}$ и центральные частоты коррелирующих вейвлетов $f_{0j\max}$ центров наиболее интенсивного вторичного излучения сигналов А(1), В(2), С(3), D(4), E(5), F(6).

На рис. 4 представлены зависимости локальных энергетических спектров $G_{Lj}^2(f, b_{j\max})$ для локальных центров вторичного излучения А(1), В(2), С(3), D(4), E(5), F(6) исследуемого объекта в полосе частот 2...13 ГГц.

На рис. 5 приведены вычисленные с использованием (2) интегральная и локальные ЭПР центров наиболее интенсивного отражения сигнала В(2) и С(3) исследуемым объектом.

Представляя отраженный СШП сигнал последовательностью отсчетов в моменты времени t_j , $j = 1, 2, \dots$, находим, что каждый из них соответствует j -му поперечному сечению объекта, $j = 1, 2, \dots$, расположенному на дальности L_{bj} , $j = 1, 2, \dots$. Эти сечения представляют собой набор частотных фильтров; наиболее прозрачные из них, пропускающие отраженный сигнал с малыми потерями, могут идентифицироваться как доминирующие локальные центры вторичного излучения.

Таким образом, на основе измерения мгновенных амплитуд, выполненного стробоскопическим методом на дискретных интервалах времени, и вейвлет-преобразований отраженных сигналов исследованы интегральная и локальные ЭПР объекта сложной формы, облучаемого СШП импульсом.

Список литературы

1. Беличенко В.П., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. Сверхширокополосные импульсные радиосистемы. Новосибирск: Наука, 2015. 481 с.
2. Астанин Л.Ю., Костылев А.А. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. М.: Радио и связь, 1989. 192 с.
3. Использование широкополосных зондирующих сигналов в задаче наведения зенитных управляемых ракет / Я.Д. Ширман [и др.] // Сборник научных трудов Харьковского университета Воздушных Сил им. И. Кожедуба. 2008. Вып. 2(17). С. 55–60.
4. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005. 342 с.
5. Лаговский Б.А. Обнаружение малозаметных радиолокационных целей путем формирования сверхкоротких импульсов при приеме сигнала // Антенны. 2007. № 1(116). С. 55–60.
6. Применение вейвлет-преобразований для измерения локальных эффективных поверхностей рассеяния объектов сложной геометрической формы в сверхширокой полосе частот / Р.В. Антипенский [и др.] // Измерительная техника. 2013. № 1. С. 60–64.
7. 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.
8. Радиолокационные устройства (теория и принципы построения) / под ред. В.В. Григорина-Рябова. М.: Сов. радио, 1970. 680 с.

Application of veyvlet-transformations for the analysis scattering of ultra-broadband signals by objects of irregular shape

R.V. Antipensky, A.P. Lyubavsky, S.N. Razinkov

On the basis of the measurement of instant amplitudes executed by a stroboscopic method on discrete intervals of time, and veyvlet-transformations of the reflected signals also the local effective surfaces of dispersion of the object of irregular shape irradiated by a ultra-broadband impulse are investigated integrated. The analysis of frequency dependences of power ranges is carried out and parameters of veyvlet-transformations for identification of the dominating centers of secondary radiation of an object are determined.

Keywords: ultra-broadband signal, local effective surface of dispersion, veyvlet-transformation, signal power veyvlet-range.

Неганов, В.А.

Современная теория и практические применения антенн: монография / В.А. Неганов, Д.П. Табаков, Г.П. Яровой; предисл. акад. Ю.В. Гуляева; под ред. В.А. Неганова. – М.: Радиотехника, 2009. – 720 с.

ISBN 978-5-88070-222-0

Неганов В.А., Табаков Д.П., Яровой Г.П.

Современная теория
и практические применения
антенн

Издательство «Радиотехника»
Москва, 2009

УДК 621.396.67
ББК 32.845

Рассмотрены основные разделы теории и техники антенн. Освещены вопросы расчета и построения различных типов антенн (от вибраторных до рупорных и антенных решеток, включая фазированные). Основное внимание уделено антеннам СВЧ и расчетам их электромагнитных полей в ближней зоне, т. е. вопросам электромагнитной совместимости.

Принципиальное отличие книги от известных заключается в последовательном применении метода физической регуляризации (самосогласованного метода) к расчету электромагнитного поля антенн, позволяющего осуществлять непрерывный переход с излучающей поверхности антенны к пространству вне ее. С помощью самосогласованного метода получены новые результаты по теории антенн: установлены связь между поверхностной плотностью тока на вибраторной антенне и напряженностью электромагнитного поля, однонаправленный режим излучения для кольцевой (рамочной антенны), режимы стоячих и бегущих волн в цилиндрической спиральной антенне, входное сопротивление практически для всех типов антенн. Теоретический материал подкреплен примерами применения многолучевых антенн.

Предназначено для разработчиков антенно-фидерных устройств, аспирантов и докторантов, занимающихся вопросами проектирования антенных систем различного назначения, студентов радиотехнических специальностей высших учебных заведений.