

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2019.3.3.003

УДК 621.396

## Импульсные функции взаимовлияния элементов при излучении сверхкоротких импульсов антенными решетками

**Б. А. Лаговский**✉, **А. Б. Самохин**МИРЭА – Российский технологический университет,  
Россия, 119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78

✉ robertlag@yandex.ru

### Аннотация

Представлены аналитические и численные результаты разработки нового метода расчета характеристик сверхкоротких импульсов, излучаемых большими антенными решетками, с учетом взаимовлияния элементов решетки. Получены аналитические выражения, описывающие частотную зависимость активного сопротивления излучателей. Обосновано использование импульсных функций взаимовлияния элементов антенной решетки. Показано, что частотная зависимость взаимовлияния элементов антенных решеток существенно изменяет характеристики излучаемых и принимаемых импульсов.

### Ключевые слова

сверхкороткие импульсы; взаимные сопротивления элементов; импульсные функций антенных решеток

### Для цитирования

Лаговский Б. А., Самохин А. Б. Импульсные функции взаимовлияния элементов при излучении сверхкоротких импульсов антенными решетками. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(3):251–260. DOI: 10.15826/urej.2019.3.3.003

## Impulse functions of the mutual coupling of the elements of the antenna arrays when emitting UWB pulses

**B. A. Lagovsky**✉, **A. B. Samokhin**Russian Technological University MIREA,  
78, Vernadskogo Ave., Moscow, 119454, Russia

✉ robertlag@yandex.ru

### Abstract

This paper presents the analytical and numerical results of the development of a new method for calculating the characteristics of UWB pulses emitted by large antenna arrays with consideration to the mutual coupling of the

elements of the array. We have obtained the analytical expressions which describe the frequency dependence of the active resistance of emitters. The use of pulse functions of the mutual coupling of the elements of the antenna array is justified. We demonstrate that the frequency dependence of the mutual influence of the elements of the antenna arrays significantly changes the characteristics of the emitted and received pulses.

### Keywords

UWB pulses, mutual coupling, impulse functions of antenna arrays

### For citation

Lagovsky B. A., Samokhin A. B. Impulse functions of the mutual coupling of the elements of the antenna arrays when emitting UWB pulses. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(3):251–260. DOI: 10.15826/urej.2019.3.3.003

## Введение

Использование UWB (ultra wide band) импульсов в радиосвязи, радиолокации и дистанционном зондировании имеет ряд существенных потенциальных преимуществ по сравнению с использованием обычных импульсов. В результате уменьшения импульсного объема радар приобретает некоторые новые особенности: увеличивается точность измерения расстояний, разрешение по дальности, появляется возможность определить класс и тип исследуемого объекта, получить его радиоизображение, поскольку принятый сигнал несет информацию не только о цели в целом, но и о ее отдельных элементах [1; 2].

Характеристики излучения при использовании UWB импульсов в антенных решетках (АР) могут значительно отличаться от их узкополосных аналогов. Сверхширокополосный спектр излучаемых UWB импульсов отличается от спектра подаваемых на излучатели АР импульсов из-за дисперсионных свойств диаграммы направленности (ДН) и взаимовлияния элементов АР.

Изменения спектрального состава, как показывают оценки, могут быть значительны, и их необходимо учитывать при расчетах и оптимизации радиотехнических систем.

## 1. Постановка задачи и метод решения

В UWB радаре сигнал значительно изменяется во время излучения и приема, а также при отражении от цели. В результате форма и спектр принимаемого сигнала сильно отличаются от исходной, что не позволяет использовать традиционные методы обработки когерентного сигнала [3–5].

Пусть сгенерированный UWB-импульс в виде  $U(t)$  поступает на каждый излучатель АР. Необходимо найти временную зависимость излучаемого импульса  $U_R(t)$ , которая может существенно отличаться от  $U(t)$ .

Будем рассматривать АР с большим количеством элементов, когда, пренебрегая краевыми эффектами, можно считать, что все излучатели находятся в одинаковых условиях. Спектр UWB импульса, излучаемого в направлении  $\varphi$ , при направлении максимума ДН в направлении  $\varphi_0$  может быть выражен как:

$$S(f, \alpha_0, \alpha) = \frac{S_0(f)D(f, \alpha_0 - \alpha)}{r(f, \alpha_0)}, \quad (1)$$

где  $D(f, \alpha_0 - \alpha)$  – ДН антенной решетки на частоте  $f$  с максимумом в направлении  $\alpha_0$ ;  $r(f, \alpha_0)$  – активное сопротивление излучателя в составе АР, зависящее, в общем случае, от расстояния между соседними излучателями, формы ДН излучателей, частоты и направления максимума излучения.

Форма излучаемого импульса находится путем применения обратного преобразования Фурье  $U_R(t) = F^{-1}[S]$ .

Для традиционно используемого спектрального метода анализа работы АР необходимо знать амплитудно-фазовый спектр генерируемых наносекундных импульсов, что далеко не всегда может быть обеспечено с достаточной точностью.

Для расчетов, связанных с излучением и приемом таких сигналов, более точен и удобен временной метод анализа. Он основан на описании АР как линейной системы с помощью импульсных функций [1; 2]. Необходимая зависимость исходного сигнала от времени  $U(t)$  достаточно точно определяется экспериментально.

Импульсные характеристики АР с помощью преобразования Фурье находятся по их частотным аналогам. ДН на каждой из используемых частот образуют спектр импульсной характеристики излучения –  $h_e(t, \alpha)$ . Методы расчетов и измерений ДН хорошо известны, и импульсная характеристика излучения может быть найдена с высокой точностью.

Используя импульсную характеристику, получим излучаемый UWB импульс без учета взаимовлияния элементов решетки в виде свертки

$$U_e(t) = \int_0^{\tau} h_e(t-x, \alpha_0, \alpha)U(x)dx, \quad (2)$$

Для построения импульсной функции необходимо знать частотную зависимость импеданса элементов антенной решетки.

Если для высокочастотных составляющих импульсов взаимовлияние элементов АР пренебрежимо мало, то на низких частотах во избежание значительных ошибок его необходимо учитывать.

Учет дисперсионных свойств взаимовлияния при использовании UWB импульсов также удобно проводить с помощью введе-

ния импульсной функции взаимовлияния. Для построения этой функции необходимо вначале найти зависимость сопротивления элемента в составе АР от частоты.

Рассмотрим плоскую эквидистантную АР с одинаковыми и одинаково ориентированными элементами. Взаимное комплексное сопротивление двух элементов, находящихся на электрическом расстоянии  $kd$  ( $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  – длина волны) обозначим как  $z(kd) = r(kd) + ix(kd)$ .

Нормированная на единицу активная часть взаимного сопротивления двух одинаковых и одинаково ориентированных элементов, находящихся на расстоянии  $d$ , в сферической системе координат определяется как:

$$r_{1,2}(kd) = \frac{1}{B} \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} f_1(\varphi, \theta) f_2^*(\varphi, \theta) \cos(kd \sin \theta) \sin \theta d\varphi d\theta, \quad (3)$$

где  $B$  – нормирующий множитель.

Пусть ДН всех излучателей одинаковы, не зависят от азимутального угла и описываются выражением  $\cos^v \alpha$ , где параметр  $v$  характеризует направленность отдельного излучателя.

В этом случае взаимное сопротивление двух соседних элементов, нормированное на собственное сопротивление излучателя, определяется выражением [4]:

$$r(kd) = \Gamma(v + 3/2) \frac{J_{v+1/2}(kd)}{(kd/2)^{v+1/2}}, \quad (4)$$

где  $\Gamma(v)$  – Гамма-функция,  $J_v$  – функция Бесселя порядка  $v$ .

Для получения значения сопротивления излучателя в составе АР в виде замкнутого выражения необходимо вначале найти сумму ряда вида:

$$W = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_v(x)}{(nx/2)^v} \cos(nx \sin \alpha_0), \quad (5)$$

который носит название обобщенного ряда Шлемильха. Значения (5) известны по справочникам только для нескольких частных случаев.

Найдем сумму ряда в общем случае. Используем известное интегральное представление функций Бесселя

$$J_v(x) = 2 \frac{(x/2)^v}{\Gamma(1/2)\Gamma(v+1/2)} \int_0^1 (1-t^2)^{v-1/2} \cos(xt) dt \quad (6)$$

и известное соотношение

$$\sum_{n=1}^{\infty} \cos(nx) = -1/2 + \pi \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(x - 2\pi m),$$

где  $\delta(x)$  – дельта-функция. При условии  $kd < 2\pi / (1 + \sin\varphi_0)$ , которое физически означает отсутствие вторичных максимумов, получим сумму обобщенного ряда Шлемильха в виде:

$$W = -\frac{1}{2\Gamma(\nu+1)} + \frac{\sqrt{\pi}}{\Gamma(\nu+1/2)x} \cos^{2\nu-1}\varphi. \quad (7)$$

В простейшем случае при  $\nu = 0$ ,  $\nu = 0,5$  и  $\varphi = 0$  из (7) следует

$$\sum_{-\infty}^{\infty} J_0(nx) = \frac{2}{x}, \quad (8)$$

что совпадает с известной суммой ряда.

Используя полученное значение  $W$ , находим сопротивление каждого излучателя в большой линейной АР:

$$r_L = \frac{2\sqrt{\pi}\Gamma(\nu+3/2)}{\Gamma(\nu+1)kd} \cos^{2\nu}\varphi_0. \quad (9)$$

Это выражение показывает, в частности, что мощность, излучаемая линейной АР, и согласование импеданса излучателей с линией питания изменяются в процессе сканирования.

Изменения более ярко выражены при высокой направленности излучателя.

Сопротивление каждого излучателя в сканирующей плоской АР получим, дважды применив (7). В итоге

$$r = \frac{4\pi(\nu+1/2)}{(kd)^2} \cos^{2\nu-1}\alpha_0. \quad (10)$$

Мнимая часть взаимного сопротивления двух элементов АР с ДН рассматриваемого вида может быть выражена с помощью функций Струве –  $H_\nu(t)$  [4]:

$$X(kd) = \frac{2\Gamma(\nu+3/2)}{\sqrt{\pi}\Gamma(\nu+1)kd} - \frac{\Gamma(\nu+3/2)H_{\nu+1/2}(kd)}{\left(\frac{kd}{2}\right)^{\nu+1/2}}. \quad (11)$$

Тогда для каждого элемента большой линейной АР:

$$X = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(kdn) \cos(kdn \sin\varphi). \quad (12)$$

Численные оценки показывают, что значение (12) для больших линейных АР оказывается близко к нулю.

Таким образом, комплексное сопротивление каждого элемента в составе большой АР с хорошей точностью принимает значение (10).

Используя (10), получим КНД большой линейной АР из  $N$  взаимодействующих элементов в виде:

$$G = \frac{2\sqrt{\pi}}{(\nu+1/2)} Nkd. \quad (13)$$

КНД оказывается независимым от направления максимума ДН антенной решетки, хотя значение ДН каждого излучателя и его сопротивление зависят от этого угла.

Из (10) следует, что для сканирующей АР удобно использовать излучатели с ДН близкой к  $\cos^{0,5}\varphi$ , так как их согласование с питающей линией остается в этом случае неизменным.

Используя найденное значение (10), получим КНД плоской антенной решетки, состоящей из  $N$  элементов:

$$G = \frac{N(kd)^2}{(v+1/2)} \cos\varphi. \quad (14)$$

Взаимовлияние излучателей в АР приводит к тому, что независимо от направленности отдельных элементов, КНД в процессе сканирования изменяется пропорционально первой степени косинуса.

Найденные дисперсионные зависимости сопротивления элемента в составе АР позволяют найти удобную для проведения расчетов импульсную характеристику сопротивления АР  $R(t, \varphi_0)$  в виде обратного преобразования Фурье:

$$R(t, \varphi_0) = F^{-1} \left[ \frac{1}{r(\alpha_0)} \right]. \quad (15)$$

Тогда при подаче на каждый излучатель АР UWB импульса  $U(t)$  импульс тока представляет собой свертку:

$$J_R(t, \alpha_0) = \int_0^{\tau} R(t-t', \alpha_0) U(t') dt'. \quad (16)$$

Одновременно учитывая дисперсионные свойства ДН и взаимовлияние излучателей приходим к импульсной характеристике излучения АР:

$$h_R(t, \alpha_0, \alpha) = F^{-1} \left[ \frac{D(\alpha_0, \alpha)}{r(\alpha_0)} \right]. \quad (17)$$

Окончательно UWB импульс, излучаемый антенной решеткой в направлении  $\alpha$  при угловом положении максимума ДН  $\alpha_0$ , отличается от генерируемого  $U(t)$  и имеет вид:

$$U_R(t, \alpha_0, \alpha) = \int_0^{\tau} h_R(t-t', \alpha_0, \alpha) U(t') dt'. \quad (18)$$

Найденная дисперсионная зависимость сопротивления элемента в составе АР (10) позволила найти импульсную характеристику сопротивления АР  $R(t, \varphi_0)$ . Кроме того, удается одновременно учесть дисперсионные свойства ДН и взаимовлияния излучателей и найти импульсную характеристику излучения АР.

## 2. Численные результаты

На математической модели плоской эквидистантной АР исследовались особенности излучения и приема UWB импульсов. Была выбрана АР с числом элементов  $N = 41 \times 41$  и расстоянием  $d = 0,7\lambda$  между соседними излучателями на выбранной средней частоте  $f_0 = 1$  ГГц. Слабонаправленные ДН отдельных элементов решетки описывались функцией вида  $\cos^2\varphi$  и не зависели от частоты.

Импульсные характеристики взаимовлияния  $R(t, \alpha_0)$  при  $\alpha_0 = 0$  для рассматриваемой АР показаны на рис. 1. Расстояния между соседними элементами на частоте  $f_0$  составили  $d = 0,7\lambda$  – жирная кривая и  $d = 0,5\lambda$  – тонкая кривая.

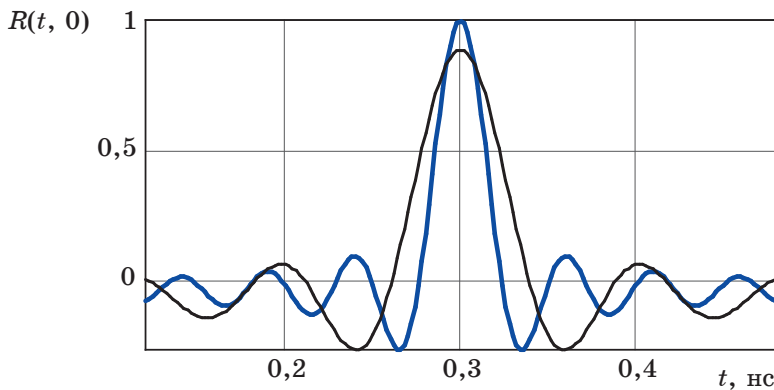


Рис. 1. Импульсные характеристики АР, описывающие взаимовлияние элементов

Fig. 1. Impulse characteristics of antenna array, describing the mutual coupling

Более наглядно взаимовлияние излучателей проявляется в спектральных составах UWB-сигналов. На рис. 2 и 3 показаны: пунктирные кривые – спектр генерируемого сигнала, тонкие сплошные кривые – спектры излучаемых импульсов без учета взаимовлияния элементов АР, жирные сплошные кривые – спектры при учете взаимовлияния. Показаны спектры UWB-импульсов, излучаемых в двух направлениях:  $\alpha = 0$  (рис. 2) и  $\alpha = 0,5\theta_{0,5}$  (рис. 3) при положении максимума ДН  $\alpha_0 = 0$ .

Без учета взаимовлияния ширина спектра уменьшилась в полтора раза по сравнению с исходным сигналом за счет большего КНД для высокочастотных составляющих. С учетом взаимовлияния ширина спектра уменьшилась почти в два раза за счет сильного взаимовлияния в низкочастотной части спектра.

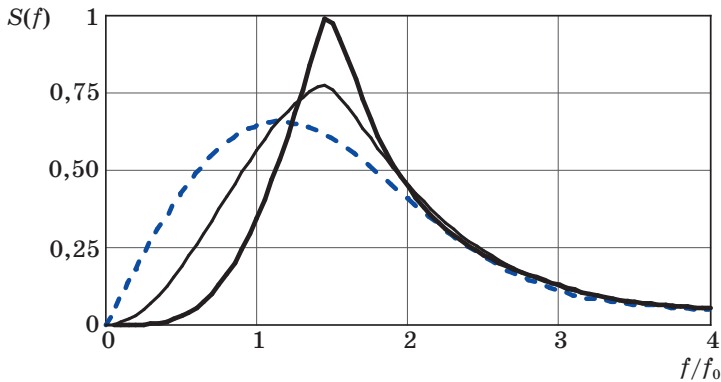


Рис. 2. Амплитудные спектры UWB импульсов, излучаемых в направлении  $\alpha = 0$

Fig. 2. Amplitude spectra of UWB pulses emitted in the direction  $\alpha = 0$

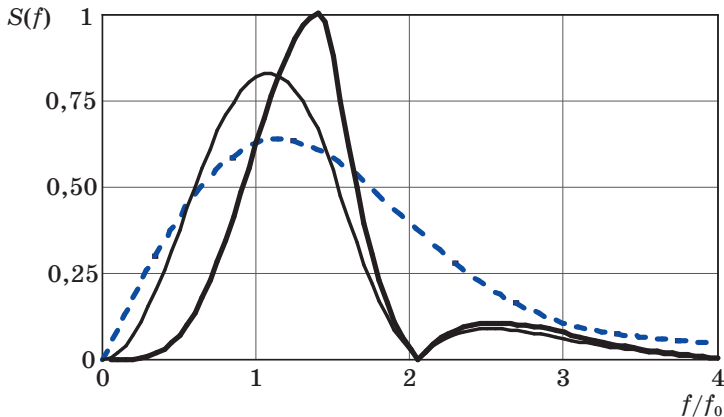


Рис. 3. Амплитудные спектры UWB импульсов, излучаемых в направлении  $\alpha = 0,5\theta_{0,5}$

Fig. 3. Amplitude spectra of UWB pulses emitted in the direction  $\alpha = 0,5\theta_{0,5}$

Ширина спектра при излучении импульсов под углом  $\alpha = 0,5\theta_{0,5}$  к оси ДН уменьшилась в 2,2 раза за счет снижения доли как низко-, так и высокочастотных составляющих. Максимум спектра сместился в сторону более высоких частот. Сужение спектра особенно важно учитывать при проектировании РЛС для обнаружения малозаметных целей, защищенных радиопоглощающими покрытиями.

Если описываемая АР используется в системе активной радиолокации для излучения и приема отраженного сигнала, то влияние дисперсионных свойств ДН и взаимовлияния элементов АР на характеристики принятого UWB-импульса увеличи-



вается, так как дисперсионные свойства АР необходимо учитывать дважды.

## Заключение

Использование импульсных характеристик АР позволяет упростить анализ их работы при использовании UWB импульсов, повысить точность расчетов. Найденная дисперсионная зависимость сопротивления элемента в составе линейной и плоской АР позволяет находить импульсную характеристику сопротивления АР и одновременно учитывать дисперсионные свойства ДН и взаимовлияния излучателей. Представленные результаты показывают, что частотная зависимость взаимовлияния элементов антенных решеток существенно изменяет характеристики излучаемых и принимаемых импульсов по сравнению и с исходными, и с UWB импульсами, рассчитанными только на основе дисперсионных свойств ДН без учета взаимовлияния излучателей.

## Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 17-07-00185.

## Acknowledgment

This research is supported by grant № 17-07-00185 from the Russian Foundation for basic research.

## Список литературы

1. Holami G., Mehrpourberney H., Zakeri B. UWB Phased Array Antennas for High Resolution Radars. In: *Proceedings of the 2013 International Symposium on Electromagnetic Theory*, 2003. Pp. 532–535.
2. Barret T. W. History of Ultra Wide Band (UWB) radar & communications: pioneers and inventors. In: *Progress in Electromagnetics Research Symp. 2000, Cambridge, MA, July. 2000*. Pp. 5–29.
3. Lagovsky B. A., Samokhin A. B., Shestopalov Y. V. Increasing accuracy of angular measurements using UWB signals. In: *11<sup>th</sup> European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). IEEE Conference Publications*. Paris; 2017. Pp. 1083–1086.
4. Вендик О. Г. *Антенны с немеханическим движением луча*. М.: Сов. Радио; 1965.
5. Lagovsky B., Samokhin A., Shestopalov Y., Increasing the Range of UWB Radars. In: *Proc. 2018 12<sup>th</sup> European Conf. on Antennas and Propagation (EUCAP), London, 2018, UK, Ser. IET Conference Publications; CP741*. DOI: 10.1049/cp.2018.1255

## References

1. Holami G., Mehrpourberney H., Zakeri B. UWB Phased Array Antennas for High Resolution Radars. In: *Proceedings of the 2013 International Symposium on Electromagnetic Theory*, 2003, pp. 532–535.

2. Barret T. W. History of Ultra Wide Band (UWB) radar & communications: pioneers and inventors. In: *Progress in Electromagnetics Research Symp. 2000, Cambridge, MA, July. 2000*, pp. 5–29.

3. Lagovsky B. A., Samokhin A. B., Shestopalov Y. V. Increasing accuracy of angular measurements using UWB signals. In: *11<sup>th</sup> European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). IEEE Conference Publications*. Paris; 2017, pp. 1083–1086.

4. Vendik O. G. *Non-mechanical beam antennas*. Moscow: Sovetskoe Radio; 1965. (In Russ.)

5. Lagovsky B., Samokhin A., Shestopalov Y., Increasing the Range of UWB Radars. In: *Proc. 2018 12<sup>th</sup> European Conf. on Antennas and Propagation (EUCAP), London, 2018, UK, Ser. IET Conference Publications; CP741*. DOI: 10.1049/cp.2018.1255

### **Информация об авторах**

**Лаговский Борис Андреевич**, доктор технических наук, профессор, МИРЭА – Российский технологический университет – РТУ МИРЭА, Россия, 119454, Москва, пр-т Вернадского, 78.

**Самохин Александр Борисович**, доктор физико-математических наук, профессор, МИРЭА – Российский технологический университет – РТУ МИРЭА, Россия, 119454, Москва, пр-т Вернадского, 78.

### **Information about the authors**

**Boris A. Lagovsky**, Doctor of Technical Sciences, Professor, MIREA – Russian Technological University – RTU MIREA, 78, Vernadskogo Ave., Moscow, 119454, Russia

**Alexander B. Samokhin**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, MIREA – Russian Technological University – RTU MIREA, 78, Vernadskogo Ave., Moscow, 119454, Russia

Поступила / Received: 15.09.2019

Принята в печать / Accepted: 10.10.2019