

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.12.13>

УДК 621.371.32

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

А. М. Бобрешов, С. Е. Нескородов, К. В. Смусева, Г. К. Усков, Н. Ю. Анохин

Воронежский государственный университет,  
394018, Воронеж, Университетская площадь, 1

Статья поступила в редакцию 12 декабря 2020 г.

**Аннотация.** В работе представлены результаты экспериментальных измерений импульсной характеристики сверхширокополосных излучателей: биконической антенны и симметричного вибратора. Приведена методика измерений, рассчитана с помощью регуляризации по Тихонову импульсная характеристика канала, показано, что измеренный сигнал соответствует ей.

**Ключевые слова:** импульсная характеристика, СШП антенны, временная область, излучение.

**Abstract.** This work presents the results of experimental measurements of the impulse response of ultra-wideband emitters: a biconical antenna and a symmetrical dipole. A measurement technique was presented. The channel impulse response is calculated using Tikhonov's regularization. It is shown that the measured signal corresponds to calculated.

**Key words:** impulse response, UWB antennas, time domain, radiation.

### Введение

Анализ излучателей во временной области сводится к расчету импульсной характеристики (ИХ) [1, 2]. Проверка сходимости численных и численно-аналитических моделей возможна по косвенным признакам – диаграммам направленности, полученным через преобразование Фурье. Однако на практике представляют интерес прямые измерения импульсной характеристики, включающий весь радиоканал: антенна – среда распространения – эталонная (известная) антенна.

В настоящей работе приведена методика измерений импульсной характеристики радиоканала антенна – среда распространения – известная антенна для двух простейших излучателей – биконического излучателя и симметричного вибратора.

## 1. Выбор импульса для измерения ИХ

Импульсная характеристика является откликом системы на воздействие дельта-импульса. Однако, как показано в работе [3], отклик останется неизменным по форме (отношение спектральных компонент друг к другу) при некотором увеличении длительности возбуждающего антенну импульса. При этом отличия наблюдаются только в амплитуде выходного сигнала.

Проиллюстрируем это на простом примере. Примем систему антенна–канал–антенна как пассивный четырехполюсник. Для определения оптимальных параметров возбуждающего импульса рассмотрим воздействие импульса на полосовой фильтр с ИХ, включающей в себя несколько периодов центральной частоты. Для определенности будем считать, что число периодов равно 3. Тогда импульсную характеристику можно записать в виде:

$$h(t) = \frac{\omega_0}{3\pi} \sin \omega_0 t \cdot H(t) H\left(\frac{6\pi}{\omega_0} - t\right) \quad (1)$$

где  $H(t)$  – ступенчатая функция Хэвисайда.

Сигнал на выходе пассивного фильтра может быть представлен как

$$y(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \frac{A}{3\pi} (\cos \omega_0 t - 1), & 0 < t < \tau \\ -\frac{A}{3\pi} \sin \frac{\omega_0 \tau}{2} \sin \omega_0 \left(t + \frac{\tau}{2}\right), & \tau < t < \frac{6\pi}{\omega_0} + \tau \\ 0, & \frac{6\pi}{\omega_0} + \tau < t \end{cases} \quad (2)$$

При значениях  $\tau$  менее четверти периода несущего колебания интервал  $[0, \tau]$  относится к переднему фронту выходного импульса и не оказывает влияния на количество минимумов и максимумов в импульсе, т.е. практически не изменяет его коэффициента широкополосности. Сигнал  $y(t)$  имеет четко выраженный максимум амплитуды при  $\omega_0 t / 2 = \pi / 2 + \pi n$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$  Оптимальным с точки зрения сохранения формы является первый максимум,

т.е.  $\tau=300$  пс. для частоты  $\omega_0=2.5\pi$  ГГц. Тогда КПД преобразования, рассчитанный как отношение энергии выходного импульса к энергии входного, составит 16%. Аналогичные выражения можно получить и для сигнала реального вида, который можно записать следующим образом:

$$x(t) = \frac{A}{\pi} \left( \frac{t}{\tau} \right)^n \left[ M^{m+1} e^{\frac{-Mt}{\tau}} - e^{\frac{-t}{\tau}} \right], \quad (3)$$

где  $n, m, M$  – параметры, определяющие форму сигнала,  $\tau$  – длительность импульса по уровню 0.5.

На рис.1. представлена зависимость КПД ударного возбуждения сигнала, состоящего из трех периодов колебания на частоте  $\omega_0=2.5\pi$  ГГц от длительности возбуждающего импульса по уровню 0.5 амплитуды. Сплошная линия относится к прямоугольному сигналу, штриховая – к сигналу реального вида с  $n=m=1, M=10$ . Область максимального КПД лежит в районе 300 пс. для прямоугольного импульса и 400 пс для сигнала вида (3), что составляет 0.13 и 0.17 длительности ИХ фильтра соответственно.

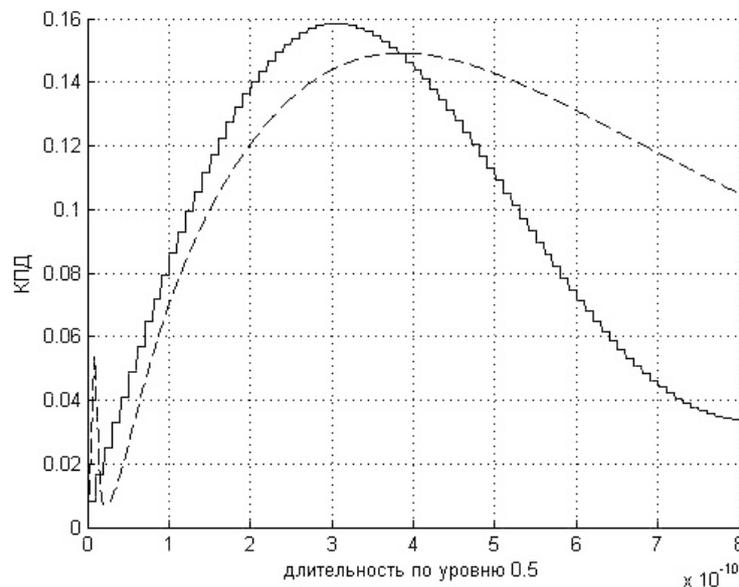


Рис.1. КПД ударного возбуждения для прямоугольного импульса (пунктирная линия) и сигнала реального вида (непрерывная линия).

Таким образом, можно определить понятие сверхкороткого импульса (СКИ) как видеоимпульса, отклик на который отличается от импульсной характеристики только амплитудой.

## 2. Методика эксперимента

В настоящей работе экспериментально измерены результаты возбуждения коротким импульсом биконического излучателя и симметричного вибратора. Антенны расположены на диэлектрических мачтах высотой 4 м на расстоянии 15 м друг от друга (рис.2) и находятся в дальней зоне друг друга. Поляризация излучателей – горизонтальная.

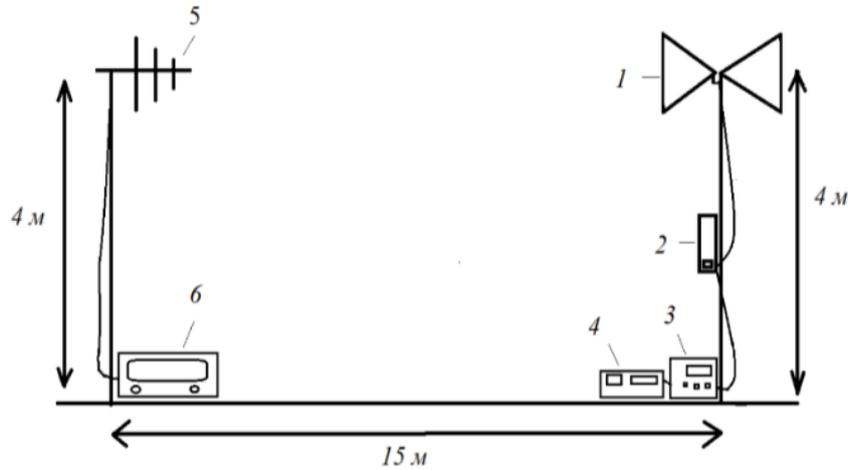


Рис.2. Схема измерений.

Используемый биконический излучатель (1 в обозначениях рис. 2) описан в работе [4]. Высота каждого конуса 114,8 мм, большой диаметр 260 мм. Питание осуществляется жестким коаксиальным кабелем с волновым сопротивлением 50 Ом. Полученные путём численного моделирования характеристики согласования (КСВН) показаны на рис. 3.

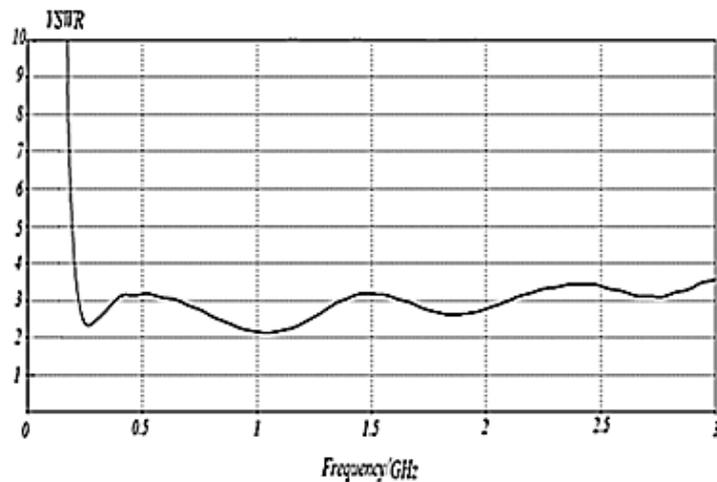


Рис.3. КСВН биконического излучателя.

Используемый симметричный вибратор (также 1 в обозначениях рис. 2) имел следующие параметры: длина плеча 1100 мм, резонансная частота 70 МГц. Подведение мощности осуществлялось без симметрирующего устройства от коаксиального кабеля. Генератор СКИ (2 в обозначениях рис. 2) закреплен на диэлектрической мачте на расстоянии 0,8 м от излучателя. Запускающий импульс (ЗИ) для генератора СКИ формировался на генераторе Agilent 91104A (3 в обозначениях рисунка 1). Он располагался у подножия мачты вместе с источником питания Mastech NY3005M2 (4 в обозначениях рис. 2). Запускающий импульс (ЗИ) поступал к генератору СКИ по коаксиальному кабелю длиной 4 м. ЗИ представляет собой прямоугольный импульс со следующими параметрами: длительность 20 нс., амплитуда 7,3 В. Повышение амплитуды ЗИ с 5 В, требуемых генератором СКИ, компенсировало затухание в кабеле. В качестве приемной антенны (5 в обозначениях рис. 2) использовалась измерительная логопериодическая антенна с горизонтальной поляризацией ETS-Lindgren Model 3142D BiConiLog Antenna. К ней с помощью кабеля длиной 6 м подсоединен стробоскопический осциллограф с полосой пропускания 20 ГГц Agilent DCA-X 86100D (6 в обозначениях рис. 2), расположенный у основания мачты. Осциллограф регистрировал принятый сигнал.

Измерения проводились следующим образом. На вход генератора ЗИ подавался сигнал синхронизации с осциллографом. Далее на генераторе запуска формировался сигнал, поступающий по коаксиальному кабелю в генератор СКИ, возбуждая его. В антенну поступал импульс формы гауссовой кривой, амплитудой около 40 В. Благодаря высоте подвеса и удаленности от иных предметов удалось избежать влияний переотражений. Сигнал на приемной антенне считывался с осциллографа и записывался в программной среде MATLAB, где проводилась дальнейшая обработка сигнала.

На рис. 4 изображен сигнал, принятый осциллографом на приемной антенне. Он содержит несколько выраженных импульсов, следующих один за другим, а также затухающие переходные процессы. Ограниченность принятого

сигнала во времени позволяет локализовать его во временном окне и позволяет минимизировать влияние непрерывных узкополосных помех

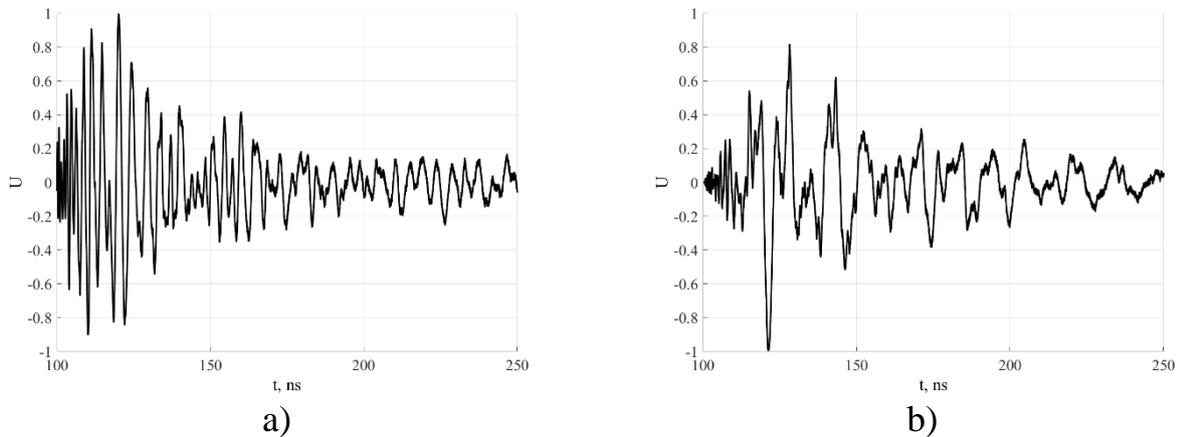


Рис.4. Нормированный сигнал на приемной антенне:  
 а) – биконический излучатель, б) – симметричный вибратор.

### 3. Обработка результатов экспериментального измерения импульсной характеристики

Сопоставим принятый сигнал импульсной характеристике канала (антенна–среда–антенна). Найдём ИХ канала по известному сигналу генератора и сигналу на осциллографе, прошедшему через радиотрассу. Нахождение ИХ – это некорректная задача с малой устойчивостью, поэтому для ее увеличения была использована регуляризация по Тихонову [5]. На рис. 5 изображены спектры выходного сигнала до (серым) и после (черным) регуляризации. С увеличением регуляризованный спектр стремится к 0, что делает задачу устойчивой.

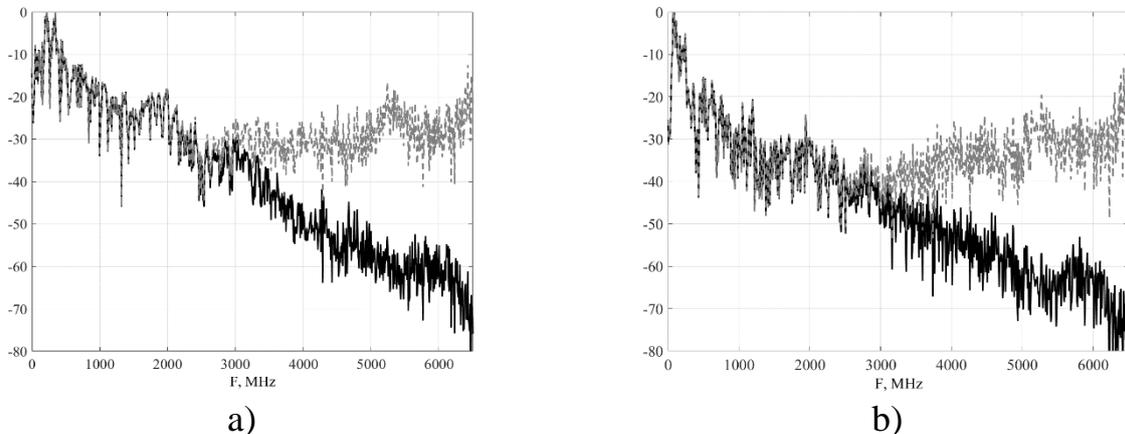


Рис.5. Нормированный спектр сигнала на приемной антенне:  
 а) – биконический излучатель, б) – симметричный вибратор.

Далее был произведен расчет импульсной характеристики. Проверка полученной ИХ производилась следующим образом. Входной сигнал воздействует на «черный ящик», имеющий полученную импульсную характеристику. Выходной сигнал от моделированного воздействия сравнивался с сигналом с приемной антенны. Оцениваемые параметры – энергия, амплитуда, эффективная длительность по критерию, приведенного в работе [6]. Максимальное отклонение расчетного выходного сигнала от экспериментальных данных составило не более 4%.

Аналогично было произведено сравнение ИХ (серым) и выходного (черным) сигналов, которые изображены на рис. 6. Отклонения в этом случае не превышает 6%, что показывает удовлетворительную сходимость результатов.

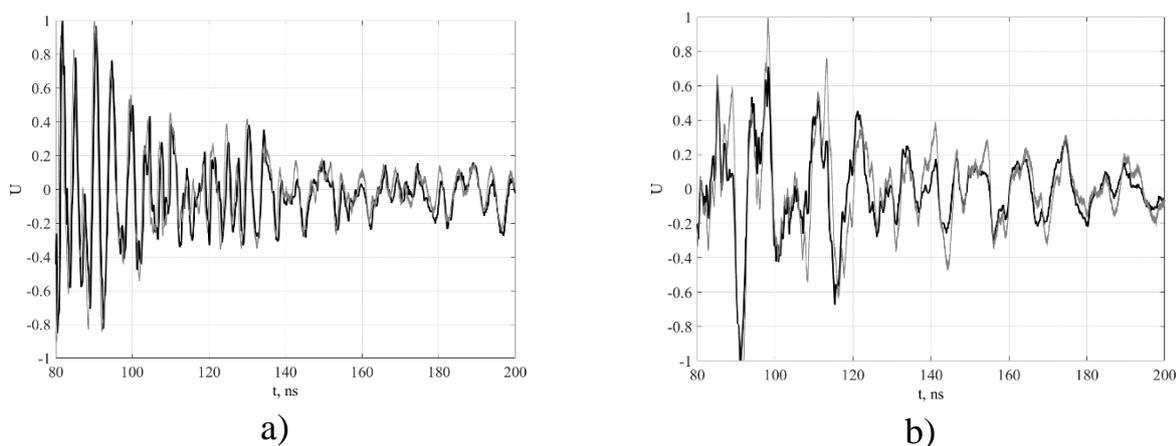


Рис 6. Нормированные импульсные характеристики (серым) и принятые осциллографом сигналы (черным):

а) биконический излучатель, б) – симметричный вибратор.

## Заключение

Проведены во временной области измерения импульсной характеристики радиоканала «антенна–среда распространения–антенна» для различных излучателей: симметричного вибратора и биконического излучателя. Анализ полученных данных показывает, что использование субнаносекундных (сверхкоротких) импульсов позволяет получить импульсную характеристику системы без дополнительной математической обработки.

## Литература

1. Mobashsher A.T., Abbosh A.M. Near-field time-domain characterisation of wideband antennas // *Electronics Letters*. 2015. Vol.51. No.25. P.2076-2078.
2. Skulkin S.P., Lysenko N. A., Uskov G.K., Bobreshov A.M. Formulas for antenna patterns in time domain and for the primitive impulse response function of linearly polarized field of plane aperture // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2020. Vol.19. No.9. P.1516-1520.
3. Бобрешов А.М., Нескородов С.Е., Усков Г.К. Ударное возбуждение сверхширокополосных пассивных линейных каскадов сверхкороткими импульсами // *Радиотехника*. 2016. №12. С.64–67.
4. Бобрешов А.М., Серегина Е.А., Смусева К.В., Усков Г.К. Методики улучшения направленных свойств апертурных приемных элементов пеленгационной решетки // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2019. Т.22. №4-1. С.44-49.
5. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. // М.: Наука. 1979. 286 с.
6. Лазоренко О.В. Черногор Л.Ф. СШП сигналы и физические процессы. 1. Основные понятия, модели и методы описания // *Радиофизика и радиоастрономия*. 2008. Т.13. №2. С.166–194.

### Для цитирования:

Бобрешов А.М., Нескородов С.Е., Смусева К.В., Усков Г.К., Анохин Н.Ю. Экспериментальное измерение импульсных характеристик сверхширокополосных излучателей. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2020. №12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.12.13>