

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ СОВМЕСТНО С АНТЕННОЙ ВИВАЛЬДИ

А. М. Бобрешов, И. И. Мещеряков, Г. К. Усков

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 15.10.2014 г.

Аннотация. Предложена совместная модель излучателя и генератора сверхкоротких импульсов, позволяющая объединить электродинамическую модель антенны, схемотехническую модель формирователя и учесть их взаимное влияние. Также предложен алгоритм расчета компонент матрицы рассеяния, позволяющий моделировать характеристики антенны исходя из расчетных или экспериментальных данных. С использованием метода конечных разностей во временной области построена электродинамическая модель антенны Вивальди, с использованием которой рассчитаны компоненты матрицы рассеяния. С помощью предложенной модели генератора сверхкоротких импульсов проведено моделирование совместно с антенной Вивальди.

Ключевые слова: сверхширокополосный, сверхкороткие импульсы, метод конечных разностей во временной области, антенна Вивальди.

Annotation. The model of the electromagnetic field source and generator of ultrashort pulses is presented and combines the electrodynamics model of the antenna circuit and the hardware model of the generator for calculating their mutual influence. The algorithm for the calculating components of the scattering matrix for antenna modeling by the calculated or experimental data is proposed. Using the electrodynamics model of the antenna Vivaldi, the components of the scattering matrix is calculated by the finite-difference time-domain method. The generator of ultrashort pulses is simulated with the Vivaldi antenna with the help of the proposed model.

Keywords: ultra-wideband, ultra-short pulses, the finite difference time-domain, antenna Vivaldi.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании антенн и генераторов для излучения сверхкоротких импульсов (СКИ) широко применяются численные методы соответственно электродинамического и схемотехнического моделирования во временной области. Характеристики антенн, как правило, рассчитываются в предположении, что источник сигнала имеет постоянное выходное сопротивление (сосредоточенный источник напряжения) или относится к стан-

дартным волноводам, а характеристики генератора моделируются при подключенном к выходу активном сопротивлении. При таком подходе получить представление о характеристиках излучателя в целом возможно лишь в том случае, если антенна и генератор согласованы в полосе формируемого сигнала, что на практик встречается нечасто. Генератор подключен к нагрузке, которая определяется входным сопротивлением антенны и имеет как активную составляющую, зависящую от частоты, так и реактивную, особенно проявляющуюся в диапазоне нижних частот.

Ниже предложена методика расчета компонент матрицы рассеяния, позволяющая ввести электродинамическую модель антенны, в качестве которой для примера используется антенна Вивальди [1, 2], в схемотехническую модель генератора.

© Бобрешов А. М., Мещеряков И. И., Усков Г. К., 2014

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ВУЗам в сфере научной деятельности на 2014-2016 годы. Проект № 978

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ АНТЕННЫ В ВИДЕ МАТРИЦЫ S-ПАРАМЕТРОВ

Учет характеристик антенны при схемотехническом моделировании работы генератора СКИ возможен, если представить излучатель в виде набора матриц S-параметров, измеренных экспериментально или рассчитанных в диапазоне частот, перекрывающих полосу излучаемого сигнала.

Предположим, что известна электрическая составляющая поля антенны $E_\gamma(t, \theta, \varphi)$ в ДЗ, где $\gamma \in \{\varphi, \theta\}$. На входе антенны – напряжение $U_a(t)$ и ток $I_a(t)$. Чтобы размерности величин соответствовали, приведем напряженность поля E_γ к напряжению следующим образом:

$$U_\gamma(t, \theta, \varphi) = E_\gamma(t, \theta, \varphi) \cdot 1 [м]. \quad (1)$$

Эквивалентный ток рассчитаем в предположении, что согласование в выбранной точке пространства идеально. В качестве нагрузки выберем резистор сопротивлением 50 Ом. Тогда:

$$I_\gamma(t, \theta, \varphi) = \frac{U_\gamma(t, \theta, \varphi)}{50}. \quad (2)$$

Ввод $U_\gamma(t, \theta, \varphi)$ и $I_\gamma(t, \theta, \varphi)$ позволяет получить эквивалентный падающий $a_1(t)$, прошедший $b_2(t)$ и отраженный $b_1(t)$ сигналы (рис. 1А), необходимые для расчета компонент матрицы S-параметров:

$$\begin{cases} a_1(t) = \frac{U_a(t) + 50I_a(t)}{2\sqrt{50}}, \\ b_1(t) = \frac{U_a(t) - 50I_a(t)}{2\sqrt{50}}, \\ a_2(t) = 0, \\ b_2(t) = \frac{U_\gamma(t, \theta, \varphi) + 50I_\gamma(t, \theta, \varphi)}{2\sqrt{50}} = \frac{U_\gamma(t, \theta, \varphi)}{\sqrt{50}}. \end{cases} \quad (3)$$

Рассматривается случай излучения, а потому наведенный на антенну сигнал отсутствует: $a_2(t) = 0$. Преимущество измерений и моделирования во временной области заключается в том, что определенные с использованием (3) сигналы позволяют рассчитать компоненты матрицы рассеяния на любой фиксированной частоте в полосе сверхширокополосного сигнала, используемого для моделирования или экспериментального измерения характеристик излучателя.

Таким образом, компоненты матрицы S-параметров для моделирования процесса излучения могут быть найдены как:

$$\begin{cases} \dot{S}_{11}(f) = \frac{\dot{b}_1(f)}{\dot{a}_1(f)}, & \dot{S}_{21}(f) = \frac{\dot{b}_2(f)}{\dot{a}_1(f)}, \\ \dot{S}_{12}(f) = 0, & \dot{S}_{22}(f) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь $\dot{a}_1(f)$, $\dot{b}_1(f)$ и $\dot{b}_2(f)$ – преобразование Фурье от $a_1(t)$, $b_1(t)$ и $b_2(t)$ соответствен-

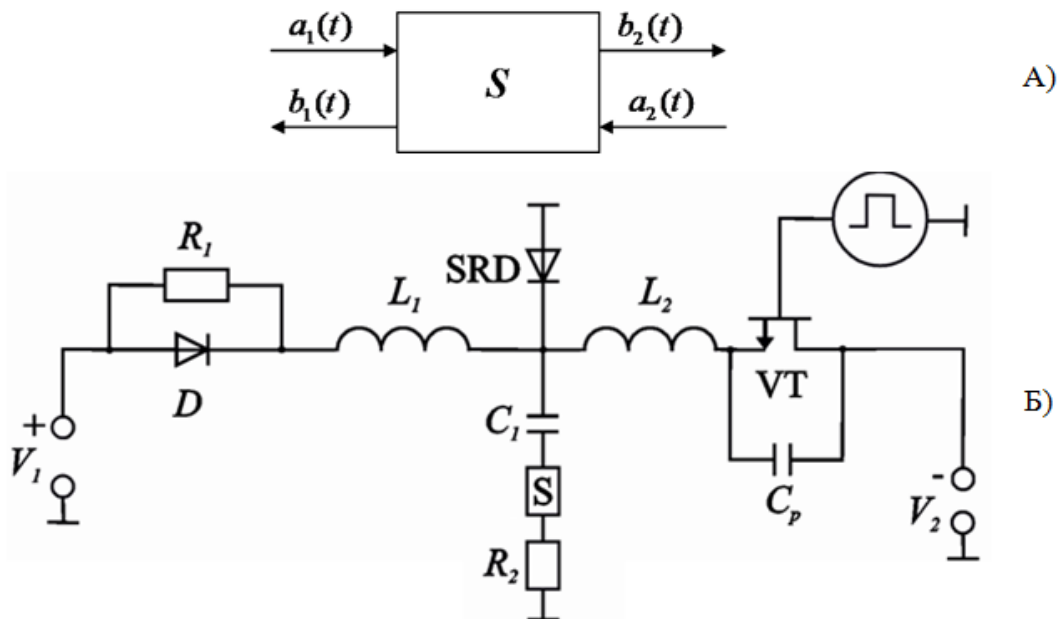


Рис. 1. Модель генератора СКИ и антенны: А) представление антенны блоком S-параметров; Б) совместная модель

но в полосе, перекрывающей спектральный диапазон генерируемого СКИ.

На рис. 1Б представлена схема генератора, описанного в работе [3], нагруженного на четырехполюсник, моделируемый матрицей рассеяния, которая используется для расчета временных откликов в ДЗ излучателя. Напряженность поля количественно равна напряжению на резисторе R_2 номиналом 50 Ом.

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫ ВИВАЛЬДИ

Для излучения СКИ выбрана антенна Вивальди, изображенная на рис. 2. Ширина щели задается уравнением

$$W(x) = W_0 \exp \left[\ln(W_L) \left(\frac{x}{L} \right)^\alpha \right] - (W_0 + b), \quad (5)$$

где длина антенны $L = 200$ мм, перекрытие слоев металлизации у источника $b = 1$ мм, $W_0 = 1$ мм, $W_L = 180$ мм, $\alpha = 0,7$. Толщина

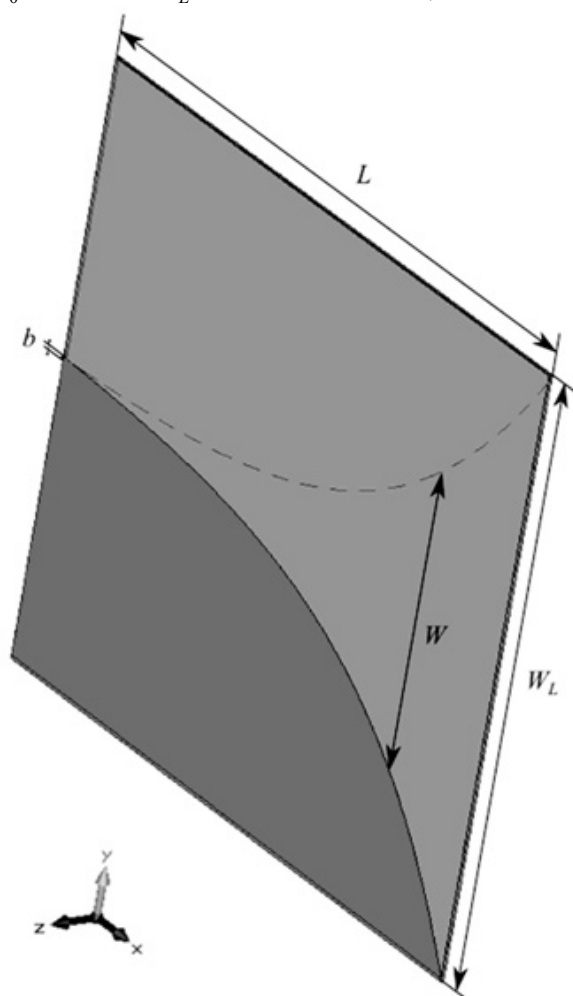


Рис. 2. Антенна Вивальди

подложки из материала FR-4 ($\epsilon_r = 4,3$) составляет 1 мм.

Расчет компонент матрицы S -параметров, описывающей излучающую антенну в схемотехнической модели, проведен с использованием метода конечных разностей во временной области FDTD [4]. С его помощью построена электродинамическая модель антенны Вивальди, позволяющая рассчитать ток и напряжение на ее входе, а также форму электрической составляющей электромагнитного поля на заданном расстоянии 3 м от антенны. Для возбуждения антенны использован сосредоточенный источник с выходным сопротивлением 50 Ом, формирующий гауссовский сверхширокополосный импульс единичной амплитуды и длительностью 100 пс по уровню 0,1. Спектр такого сигнала перекрывает полосу импульса, поступающего на вход антенны с выхода генератора, и занимает диапазон до 14,6 ГГц по уровню -20 дБ.

Антенна и окружающая ее область пространства на расстоянии 10 см, что составляет четверть длины волны для частоты 750 МГц, ниже которой у выбранной антенны коэффициент стоячей волны по напряжению превышает 3, разбивается на прямоугольные ячейки размером 1, 0,25 и 0,25 мм вдоль осей X , Y , Z соответственно. Такой пространственный шаг дает возможность достаточно точно представить геометрию антенны и позволяет аппроксимировать частоты до 10 ГГц в спектре сигнала более, чем 30 ячейками в свободном пространстве. На границе задаются поглощающие условия PML, чтобы не было отражений от границ вычислительного объема [4].

В этом объеме решается система уравнений Максвелла, что позволяет получить форму тока и напряжения на входе антенны. Далее происходит преобразование поля из ближней зоны в дальнюю, или в заданную точку пространства, для которой вычисляется электрическая составляющая электромагнитного поля [5].

Таким образом, получены необходимые данные для расчета компонент матрицы S -параметров и совместного моделирования антенны с генератором сверхкоротких импульсов.

РЕЗУЛЬТАТ СОВМЕТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Проведено схемотехническое моделирование совместной работы генератора сверхкоротких импульсов и антенны Вивальди во временной области. На рис. 3 представлен

сигнал на выходе генератора при подключенной нагрузке 50 Ом (кривая 1) и при подключении антенны Вивальди (кривая 2). Хорошо видно, что форма импульса на выходе генератора не меняется. При подключенном излучателе присутствует отраженный импульс, появляющийся менее чем через 2 нс после

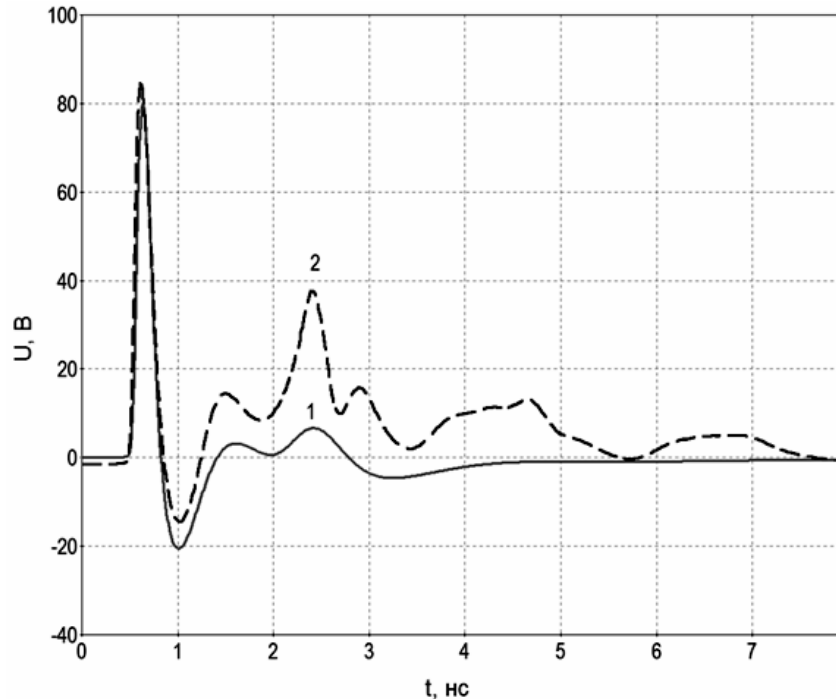


Рис. 3. Сигнал на выходе генератора СКИ при подключении: 1) сопротивления 50 Ом; 2) антенны Вивальди

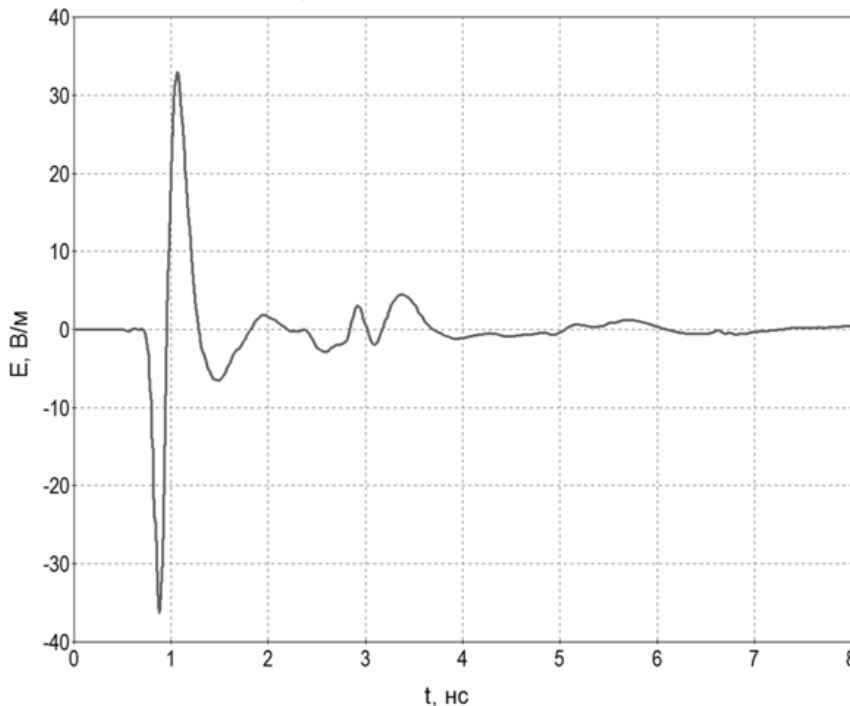


Рис. 4. Напряженность электрической составляющей поля на расстоянии 3 м от антенны в направлении оси X

импульса генератора. Наличие отраженного сигнала объясняется неидеальным согласованием антенны с генератором в области низких частот.

На рис. 4 представлена напряженность электрической составляющей поля на заданном расстоянии 3 м от антенны. Длительность импульса по уровню 0 составляет приблизительно 570 пс, размах – 69,2 В/м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена модель, дающая возможность учитывать взаимное влияние генератора и СШП антенны при моделировании излучения сверхкоротких импульсов. Предложен алгоритм расчета компонент матрицы рассеяния, позволяющий моделировать характеристики антенны исходя из расчетных или экспериментальных данных.

С использованием метода конечных разностей во временной области построена электродинамическая модель антенны Вивальди. Рассчитаны компоненты матрицы рассеяния на основе полученных данных, и модель антенны введена в схемотехническую модель генератора.

На примере антенны Вивальди проведено моделирование генератора СКИ совместно с излучающей антенной. Показано, что сигнал на выходе формирователя изменяется незначительно при подключении вместо активного сопротивления 50 Ом сверхширокополос-

ной антенны, но имеет место отраженный от антенны импульс, который появляется с задержкой менее 2 нс относительно основного. На форму сигнала в заданной точке пространстве он не влияет, как можно заключить, анализируя сигнал на рис. 4. Тем не менее, отраженный сигнал может повлиять на частоту повторения импульсов, ограничивая ее сверху.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gibson P. J. The Vivaldi aerial [Text] / P. J. Gibson // 9th Europe Microwave Conference, 1979, p.101-105.

2. Ашихмин А. В. Проектирование и оптимизация сверхширокополосных антенных устройств и систем для аппаратуры радиоуправления. М.: Радио и связь, 2005.

3. Бобрешов А. М. Генерация сверхкоротких импульсных сигналов [Текст] / А. М. Бобрешов, Ю. И. Китаев, В. А. Степкин, Г. К. Усков // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, том 14, №3, 2011. – С. 103-108.

4. Davidson D. B. Computational Electromagnetics for RF and Microwave Engineering / D. B. Davidson – Cambridge: Cambridge Univ. Press. – 2005.

5. Ramahi O. M. Near- and far-field calculations in FDTD simulations using Kirchoff surface integral representation [Text] / O. M. Ramahi // IEEE Trans. 1997. – V. AP-45. – № 5. – P. 753.

Бобрешов А. М. – д. ф.-м. н., профессор, зав. кафедрой электроники Воронежского государственного университета. Тел.: +7 (473) 255-19-19
E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru

Мещеряков И. И. – к. ф.-м. н., инженер кафедры электроники Воронежского государственного университета. Тел.: +7 (910) 243-91-85
E-mail: ivan.phelec@mail.ru

Усков Г. К. – к. ф.-м. н., доцент кафедры электроники Воронежского государственного университета. Тел.: +7 (952) 953-82-94
e-mail: uskov@phys.vsu.ru

Bobreshov A. M. – Doctor of physical and mathematical sciences, Professor, Head of the Department of Electronics, Voronezh State University. Tel.: +7 (473) 255 19 19
E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru

Meshcheryakov I. I. – Candidate of physical and mathematical sciences, Engineer, Department of Electronics, Voronezh State University. Тел.: +7 (910)243-91-85. E-mail: ivan.phelec@mail.ru

Uskov G. K. – Candidate of physical and mathematical sciences, Associate Professor, Department of Electronics, Voronezh State University. Тел.: +7 (952) 953 82 94
E-mail: uskov@phys.vsu.ru