

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОТРАЖЕНИИ И РАСПРОСТРАНЕНИИ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

*И.Ф. Будагян, М.Н. Илюшечкин*

(<sup>1</sup> Москва, Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики, budif@yandex.ru; hexvoltt@gmail.com)

**MODELLING OF WAVE PROCESSES AT REFLEXION AND PROPAGATION OF NANOSECOND PULSES**

*I.N. Budagyan, M.N. Ilyushechkin*

Методами математического моделирования проведено исследование процессов распространения наносекундных сигналов в многослойных средах. Особенностью является исследование сред конечной толщины с отрицательными параметрами (диэлектрической  $\epsilon$  и магнитной  $\mu$  проницаемостями), называемых метаматериалами. Метаматериалы — перспективное направление исследований в настоящее время, о чем говорит большое количество публикаций ежегодно [1]. Применение метаматериалов позволяет улучшить характеристики приемных и передающих устройств. Сигналы наносекундной длительности также обладают рядом преимуществ по сравнению с более длинными, узкополосными сигналами, и находят применение во многих областях, в частности радиолокации, медицине. Таким образом, проводимое исследование является актуальным.

Методами спектрального анализа выполнялось моделирование процесса распространения импульса  $S(t)$  (рис. 1) с горизонтальной или вертикальной поляризацией волн, падающего под углом  $\theta$  из вакуума  $0$  на систему из одного или нескольких слоев конечной толщины ( $1, 2, \dots, n$ ) с выходом в среду вакуума  $n+1$ . Границы слоев плоские, от них происходит многократные отражение и преломление импульса, дающие результирующие отраженный  $G(t)$  и прошедший в среду выхода  $G_{\pi}(t)$  сигналы.

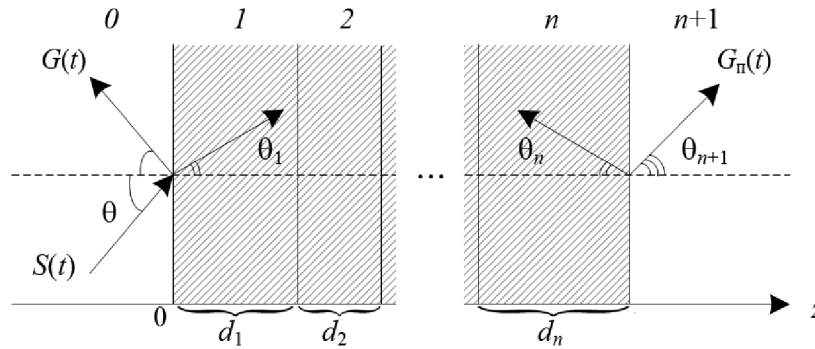


Рис. 1

Исследование проводилось для импульсов каноничных форм единичной амплитуды, длительность которых устанавливалась равной 1 нс: прямоугольного, треугольного, экспоненциального, гауссова типа и других. В качестве метаматериалов исследовались ENG-среды ( $\epsilon < 0, \mu > 0$ ): плазменные слои и слои композитного метаматериала в виде набора тонких металлических проводников, погруженных в поддерживающий диэлектрик; MNG-среды ( $\epsilon > 0, \mu < 0$ ): слои композитного метаматериала в виде двойного кольцевого резонатора; DNG-среды ( $\epsilon < 0, \mu < 0$ ). Моделировались изменение топологических параметров метаструктур с учетом их реальной дисперсии и нормированная к длительности импульса толщина слоя. Сравнение проводилось для слоев полубесконечной и конечной толщины, без потерь и с потерями.

Коэффициенты отражения и прозрачности вычисляются по известным формулам [2], с использованием параметрических (комплексных) форм записи для импеданса  $Z_m$  и коэффициента преломления слоя  $n_m$ , что позволяет учесть отрицательность параметров сред:

$$Z_m = Z_0 \sqrt{|\mu_m|/|\varepsilon_m|} \exp(-j/2[\varphi_{\mu m} - \varphi_{\varepsilon m}]), \quad n_m = \sqrt{|\varepsilon_m| \cdot |\mu_m|} \exp(-j/2[\varphi_{\mu m} + \varphi_{\varepsilon m}]),$$

где  $Z_0$  — характеристический импеданс вакуума,  $\varphi_{\mu m}$  и  $\varphi_{\varepsilon m}$  — фазы проницаемостей среды.

Задача заключалась в поиске оптимального сочетания параметров импульсов и характеристик сред, обеспечивающих высокие показатели отражения или прохождения сигнала, с учетом минимизации искажения его формы. Для этого оценивались степень отражения  $\eta$ , равная отношению энергии отраженного сигнала к энергии падающего импульса, и степень воспроизведения формы исходного импульса  $\delta$  ( $\delta_{\text{отр}}$ ) для прошедшего (отраженного) сигналов. Параметр  $\delta$  ( $\delta_{\text{отр}}$ ) принимался равным модулю коэффициента корреляции Пирсона [3], рассчитанного для совмещенных по оси времени выборок падающего и прошедшего (отраженного) сигналов.

Так, отражение наносекундных импульсов от слоя ENG-метаматериала становится высоким уже при небольших толщинах слоя (при  $d_1$  порядка 0,5 мм и проницаемости слоя  $\varepsilon_1 = -4$  наблюдается отражение близкое к полному с высоким воспроизведением отраженным сигналом формы исходного импульса). Через слой DNG-метаматериала ( $\varepsilon_1 = -1,1$ ,  $\mu_1 = -1,1$ ), заключенного между сред с близкими показателями диэлектрической проницаемости ( $\varepsilon_0 = 1$ ,  $\varepsilon_2 = 1,1$ ), импульсы проходят почти без отражения вплоть до углов падения  $\theta = 75^\circ$  и толщине 3 мм. При этом для импульсов разной поляризации результаты оказываются близкими.

Интерес представляет анализ многослойных сред, комбинация параметров которых (толщина и характеристики слоев) позволяет достичь почти полного прохождения импульсов при достаточно больших толщинах слоев [4]. В частности, для такой структуры ( $\varepsilon_1 = -4$ ;  $d_1 = 0,5$  мм,  $\varepsilon_2 = 3$ ,  $d_2 = 1,2$  мм) можно наблюдать прохождение, близкое к полному при значениях  $\delta \approx 0,98$ . На рис. 2 приведены формы прошедших сигналов некоторых типов: а) гауссова симметричного, б) гауссова биполярного, в) в виде разности полиномов Лагерра, г) прямоугольного. Амплитуда отраженного сигнала при этом не превышает уровня 0,03.

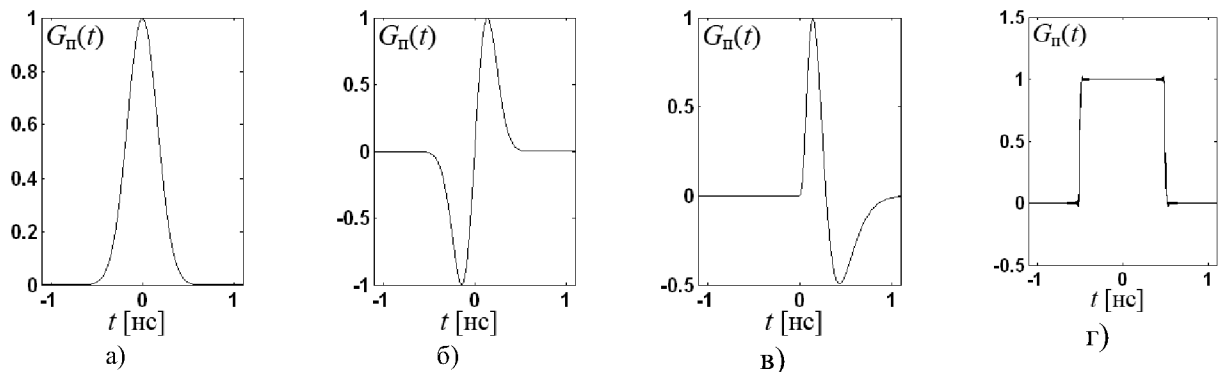


Рис. 2

Таким образом, в работе осуществлено моделирование волновых процессов при распространении наносекундных импульсов различной формы через однослойные и многослойные структуры с учетом минимизации искажений их формы при отражении и прохождении. Проанализированы оптимальные характеристик сред.

### Литература

1. Слюсар В., *Метаматериалы в антенной технике: история и основные принципы* // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес №8, 2009, – с.66-70.
2. Бреховских Л.М. *Волны в слоистых средах.* – М.: Наука, 1973. — 502 с.
3. Гмурман В.Е. *Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие для вузов – 10-е издание.* – М: Высшая школа, 2004. – 479 с. – ISBN 5-06-004214-6, с. 177.
4. И.Ф.Будагян, М.Н. Илющечкин, Г.Г. Щучкин *Анализ формы наносекундных сигналов. Излучение и распространение.* LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG – 132с. ISBN: 978-3-8473-9259-0