

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОТРАЖЕНИИ И РАСПРОСТРАНЕНИИ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

И.Ф. Будагян, М.Н. Илюшечкин

(¹ 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 ϵ и магнитной μ 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 θ 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 $G_n(t)$ сигналы.

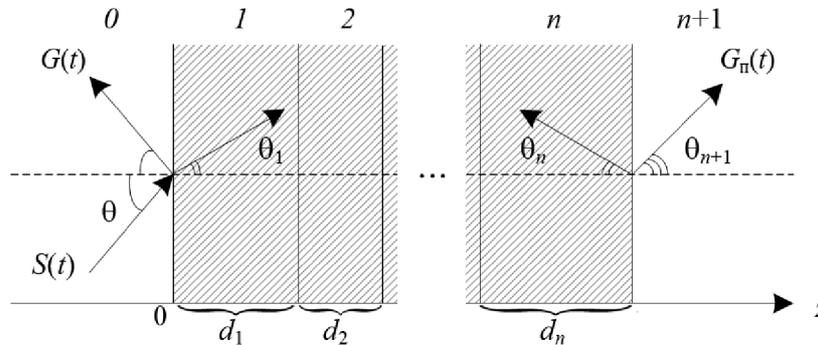


Рис. 1

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 η , равная отношению энергии отраженного сигнала к энергии падающего импульса, и степень воспроизведения формы исходного импульса δ ($\delta_{отр}$) для прошедшего (отраженного) сигналов. Параметр δ ($\delta_{отр}$) 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.

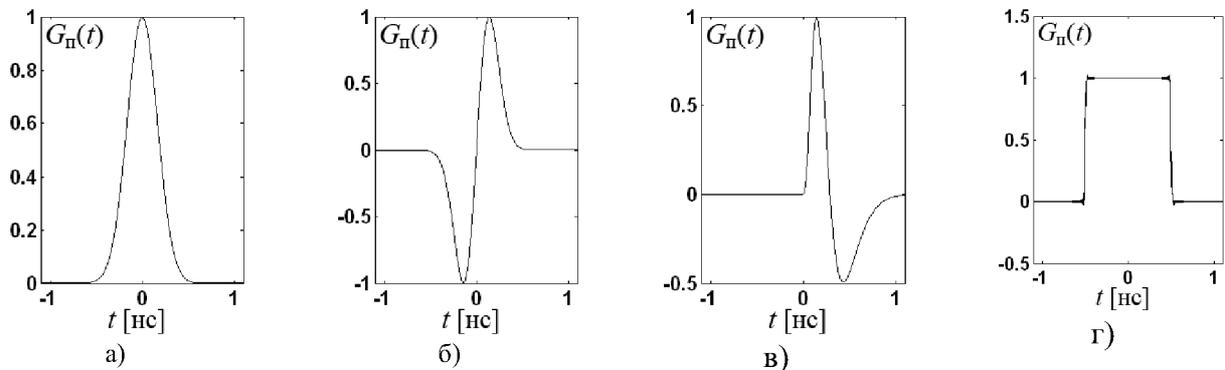


Рис. 2

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