

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ НА БАЗЕ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ

А. С. Мигель

*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь
E-mail: anton.migel.99@mail.ru*

Представлены результаты численного моделирования двух структур, реализующих пространственное дифференцирование 2-го порядка функции одной переменной. Проведено сравнение результатов функционирования дифференциаторов 2-го порядка для различных входных функций.

Ключевые слова: *метаматериал, метаповерхность, пространственное дифференцирование 2-го порядка.*

Метаматериалы, обладающие уникальными электромагнитными свойствами, являются объектом интенсивного исследования. Это связано с большими потенциальными возможностями их применения в оптике и микроволновой технике. Одним из актуальных направлений использования метаматериалов являются аналоговые вычисления. Математические операции выполняются по мере распространения электромагнитных волн через эти метаматериалы. Такие конструкции потенциально могут привести к сверхбыстрым аналоговым вычислениям и обработке сигналов на аппаратном уровне [1, 2].

Проводилось исследование дифференциаторов 2-го порядка двух типов. Первый вариант дифференциатора 2-го порядка заключается в использовании структуры, состоящей из слоев с градиентным показателем преломления и метаповерхности. Второй вариант состоял в использовании многослойной структуры, рассчитанной непосредственно из условия формирования заданного пространственного преобразования входного сигнала.

На рис. 1 а) представлена модель первого варианта, а на рис. 1 б) – второго, соответственно. Рассмотрим более детально данные модели. Стоит отметить, что данные системы будут функционировать при условии сохранения волновых размеров.

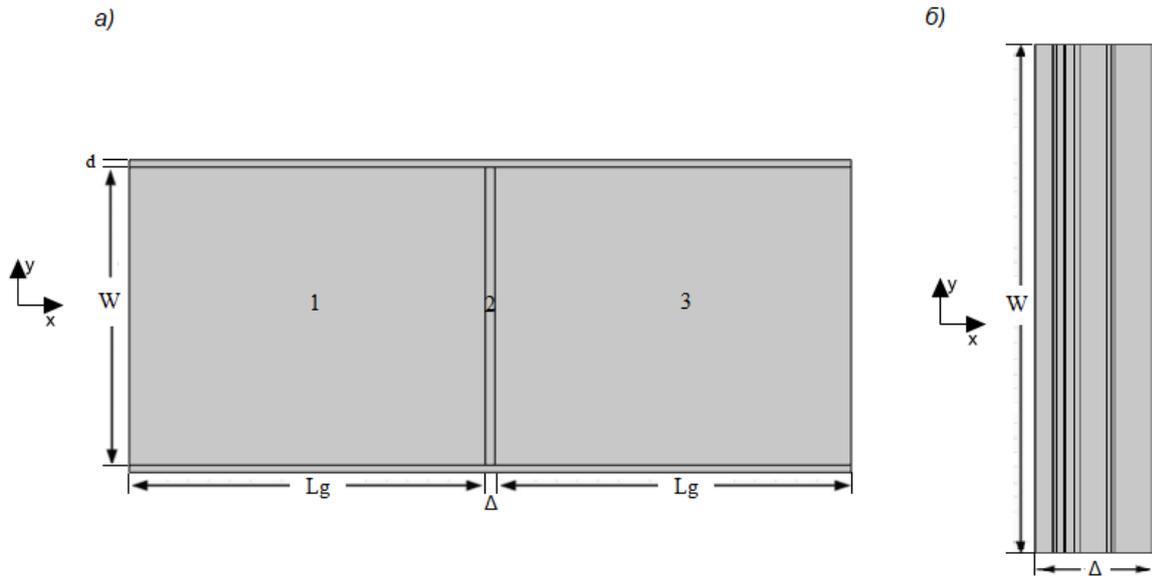


Рис. 1. Модели структур, реализующих дифференцирование 2-го порядка по пространственной координате.

Первая модель состоит из трех областей (рис. 1 а)): области 1 и 3 с градиентным показателем преломления и метаповерхности (область 2), с параметрами $\lambda=0,5 \cdot 10^{-6}$ м, $W=10 \cdot \lambda$, $L_g=12 \cdot \lambda$, $\Delta=\lambda/3$. Область 1 выполняет прямое преобразование Фурье, область 2 кодирует заданную функцию пропускания, а область 3 реализует обратное преобразование Фурье. Действительная и мнимая части коэффициента преломления для областей 1 – 3 изменялись по следующим выражениям [3]:

$$\eta_1(y) = -\eta_3(y) = 1,41 \sqrt{1 - \left[\frac{\pi}{2L_g}\right]^2 y^2}, \quad (1)$$

$$\kappa_1 = \kappa_3 = 0, \quad (2)$$

$$\eta_2(y) = \operatorname{Re}\left\{i \frac{2\lambda}{2\pi\Delta} \left[i\frac{\pi}{2} + \ln\left(\frac{W}{2y}\right)\right]\right\}, \quad (3)$$

$$\kappa_2(y) = -\operatorname{Im}\left\{i \frac{2\lambda}{2\pi\Delta} \left[i\frac{\pi}{2} + \ln\left(\frac{W}{2y}\right)\right]\right\}, \quad (4)$$

где η – действительная часть коэффициента преломления, κ – мнимая часть коэффициента преломления.

Вторая модель представляет собой структуру (рис. 1 б)), состоящую из 10 слоев, с параметрами $\lambda=0,5 \cdot 10^{-6}$ м, $W=10 \cdot \lambda$, $\Delta=1,2 \cdot \lambda$. Диэлектрическая проницаемость и толщина каждого слоя представлены в таблице.

Диэлектрическая проницаемость и толщина каждого слоя метаповерхности, реализующей дифференцирование 2-го порядка

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ϵ_r	13,85	5,98	4,44	0,06	0,03	0,01	-0,003	-2,12	2,30	0,08
d	$\lambda/293,4$	$\lambda/6,0$	$\lambda/212,9$	$\lambda/24,2$	$\lambda/12,1$	$\lambda/9,8$	$\lambda/25,0$	$\lambda/3,6$	$\lambda/14,5$	$\lambda/2,4$

Проводился анализ работы дифференциаторов 2-го порядка при различных функциональных зависимостях входной функции $E_z(y)$. E_z компонента электрического поля падающей волны изменялась по законам (5) и (6)

$$E_z(y) = \frac{y}{\lambda} \exp\left(-\left(\frac{y}{\lambda}\right)^2\right), \quad (5)$$

$$E_z(y) = \exp\left(-\left(1,5 + \frac{y}{\lambda}\right)^2\right) + \frac{1}{2} \cdot \exp\left(-\left(1,5 - \frac{y}{\lambda}\right)^2\right), \quad (6)$$

где λ – длина волны.

Пример выполнения операции дифференцирования 2-го порядка над E_z компонентой электрического поля падающей волны, изменяющейся по закону (5), представлен на рис. 2.

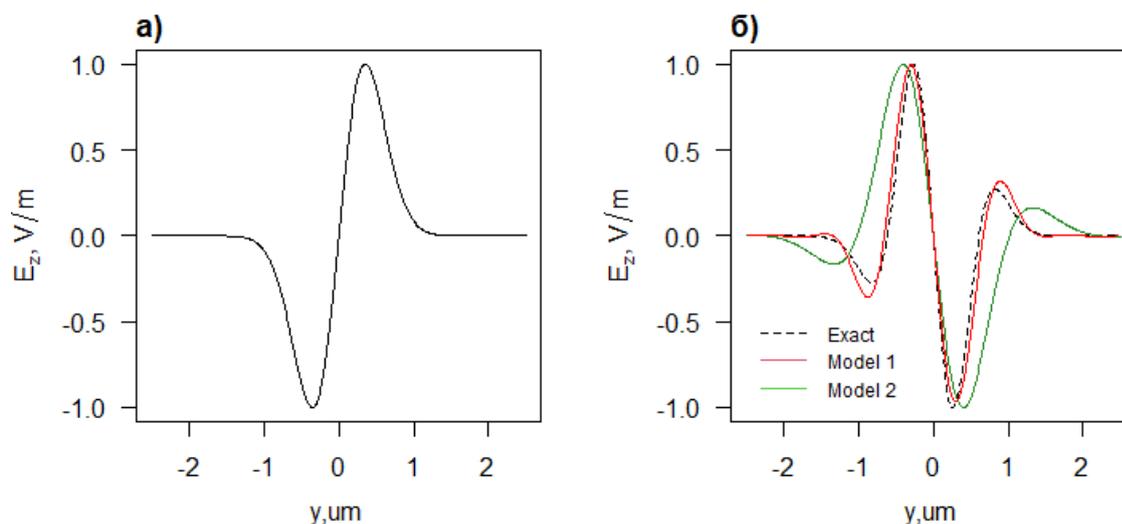


Рис. 2. Дифференцирование второго порядка: а) зависимость E_z компоненты электрического поля падающей волны, изменяющейся по закону (5); б) сравнительный график результатов моделирования двух моделей и аналитического расчета.

Пример выполнения операции дифференцирования 2-го порядка над E_z компонентой электрического поля падающей волны, изменяющейся по закону (6), представлен на рис. 3.

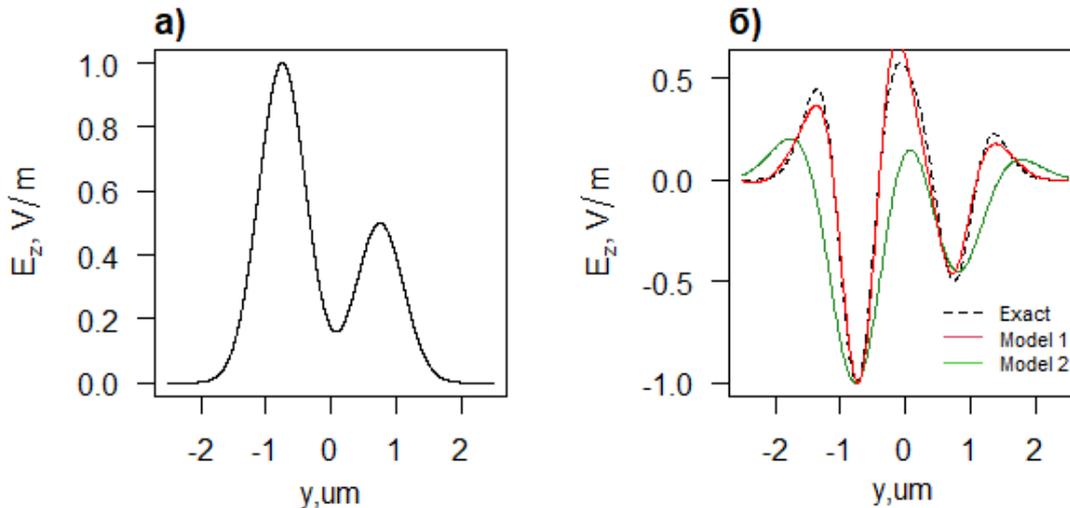


Рис. 3. Дифференцирование второго порядка: а) зависимость E_z компоненты электрического поля падающей волны, изменяющейся по закону (6); б) сравнительный график результатов моделирования двух моделей и аналитического расчета.

Результаты дифференцирования 2-го порядка согласуются с аналитическим расчетом. Однако над результатом, полученным с помощью модели № 1, проводилась дополнительная операция отражения относительно начала координат.

В результате сравнительного анализа было установлено, что:

- модель № 2 обладает более компактными размерами;
- для выполнения операции дифференцирования 2-го порядка предпочтительнее использовать модель № 1.

К недостаткам рассмотренных дифференциаторов 2-го порядка можно отнести сложность технологической реализации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Silva A., Monticone F., Castaldi G. et al. Performing Mathematical Operations with Metamaterials // *Science*. 2014. V. 343. P.160 – 163.
2. Zangeneh-Nejad F., Sounas D.L., Alù A. et al. Analogue computing with metamaterials // *Nat Rev Mater*. 2021. V.6. P.207 – 225.
3. Dai C., Zhao Z.G., Li X., Yang, H. Performing derivative and integral operations for optical waves with optical metamaterials // *Physics Letters A*. 2016. V. 380. P. 3942 – 3948.