

УДК 537.8.029.6

DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2026_2_67_46

EDN: VOGRKZ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИМИТАЦИИ ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА ЗА СЧЁТ СОЗДАНИЯ ВРЕМЕННОЙ ГРАНИЦЫ МЕТАМАТЕРИАЛА

И. В. Семченко¹, И. А. Фаняев², А. Л. Самофалов², П. В. Сомов², М. Ю. Евсиевич¹,
С. А. Хахомов², Цзихун Гу³, Даши Динг³

¹ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск

²Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

³Нанкинский университет науки и технологии

THEORETICAL FOUNDATIONS OF SIMULATING THE DOPPLER EFFECT BY CREATING A TEMPORAL BOUNDARY OF A METAMATERIAL

I. V. Semchenko¹, I. A. Fanyaev², A. L. Samofalov², P. V. Somov², M. Yu. Yeusiyeovich¹,
S. A. Khakhomov², Jihong Gu³, Dazhi Ding³

¹SSPA "Optics, Optoelectronics and Laser Technology", Minsk

²Francisk Skorina Gomel State University

³Nanjing University of Science and Technology

Аннотация. Изложены теоретические основы имитации эффекта Доплера за счёт создания временной границы для метаматериала. Рассмотрены случаи имитации как приближающегося, так и удаляющегося объекта, излучающего волны. Предложены варианты параллельного либо последовательного подключения варикапов к микрорезонаторам метаматериала для преобразования волн на временной границе.

Ключевые слова: эффект Доплера, временная граница, метаматериал, варикап, динамическое управление.

Для цитирования: Теоретические основы имитации эффекта Доплера за счёт создания временной границы метаматериала / И. В. Семченко, И. А. Фаняев, А. Л. Самофалов, П. В. Сомов, М. Ю. Евсиевич, С. А. Хахомов, Цзихун Гу, Даши Динг // Проблемы физики, математики и техники. – 2026. – № 2 (67). – С. 46–51. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2026_2_67_46. – EDN: VOGRKZ

Abstract. The theoretical foundations of simulating the Doppler effect by creating a temporal boundary for a metamaterial are presented. Cases of simulating both an approaching and receding object emitting waves are considered. Options for parallel or sequential connection of varactors to the metamaterial microresonators for wave conversion at the temporal boundary are proposed.

Keywords: Doppler effect, temporal boundary, metamaterial, varactor, dynamic control.

For citation: Theoretical foundations of simulating the Doppler effect by creating a temporal boundary of a metamaterial / I. V. Semchenko, I. A. Fanyaev, A. L. Samofalov, P. V. Somov, M. Yu. Yeusiyeovich, S. A. Khakhomov, Jihong Gu, Dazhi Ding // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2026. – № 2 (67). – P. 46–51. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2026_2_67_46 (in Russian). – EDN: VOGRKZ

Введение

Пространственно-временная модуляция метаповерхностей позволяет изменять их свойства не только в пространстве, но и во времени. Это открывает новые возможности для управления рассеянием волн, в том числе на движущихся объектах, где традиционные методы сталкиваются с ограничениями из-за доплеровских эффектов и нестационарности задачи.

Динамическое управление электромагнитным откликом движущихся объектов является одной из наиболее актуальных и сложных задач современной радиофизики и инженерии. Движение объекта порождает доплеровский сдвиг частоты рассеянной волны, который не только служит

доплеровских радаров, но и нарушает когерентные фазовые соотношения, лежащие в основе работы большинства маскирующих покрытий. Для решения этой проблемы было предложено несколько классов перестраиваемых метаповерхностей, каждый со своими сильными и слабыми сторонами [1]–[6].

В данной работе рассмотрены теоретические основы имитации эффекта Доплера за счёт создания временной границы для метаматериала. Наличие временной границы предполагает достаточно быстрое, в идеальном случае – мгновенное, изменение свойств метаматериала в некоторый момент времени.

1 Теоретические основы

Эффект Доплера описывает изменение длины волны в зависимости от того, как движется излучатель или приемник. Если движется источник излучения, то справедлива формула:

$$\lambda = 2\pi \frac{c - v}{\omega_0},$$

где λ – длина волны излучения; c – скорость распространения волн в среде (нами рассматривается свободное пространство); v – скорость источника волн относительно среды ($v > 0$, если источник приближается к приёмнику, $v < 0$, если удаляется); ω_0 – угловая частота, с которой источник испускает волны.

Изменение частоты для общего случая движения источника и приёмника описывается формулой:

$$\omega = \omega_0 \frac{1 + \frac{u}{c}}{1 - \frac{v}{c}},$$

где u – скорость приёмника относительно среды, $u > 0$, если приёмник движется по направлению к источнику.

Целью работы является имитация эффекта Доплера за счёт создания временной границы для метаматериала. Наличие временной границы означает, что в некоторый момент времени диэлектрическая и/или магнитная проницаемость метаматериала очень быстро изменяются (скачком). Рассмотрим случай имитации доплеровского сдвига частоты при $u = 0$, то есть приёмник неподвижен. Тогда

$$\omega = \frac{\omega_0}{1 - \frac{v}{c}}. \quad (1.1)$$

На основании статей [7], [8] учтем, что при образовании временной границы происходит изменение частоты отраженной и прошедшей волн относительно падающей волны, а волновое число не изменяется, оно является одинаковым для всех волн. Такое поведение волн существенно отличается от случая пространственной границы двух сред, при наличии которой изменяется волновое число преломленной волны, а частота является одинаковой для всех волн – падающей, отраженной и преломленной. Используя свойство постоянства волнового числа на временной границе, можно записать

$$\omega_2 = \omega_1 \frac{v_2}{v_1}, \quad (1.2)$$

где v_2 и v_1 – фазовые скорости волн в метаматериале после и до временной границы; ω_2 и ω_1 –

угловые частоты волн в метаматериале после и до временной границы. Поскольку в момент создания временной границы происходит изменение частоты волн, возникает возможность использования временной границы для имитации эффекта Доплера, который также характеризуется изменением частоты волн. В случае такой предполагаемой имитации должны выполняться следующие соотношения: $\omega_1 = \omega_0$ – частота до временной границы равна частоте волны, излучаемой движущимся источником; $\omega_2 = \omega$ – частота после временной границы равна частоте излучения, принимаемого неподвижным приемником.

Тогда из формул (1.1) и (1.2) следует

$$\begin{aligned} \frac{v_2}{v_1} &= \frac{1}{1 - \frac{v}{c}}, \quad \frac{\sqrt{\varepsilon_1 \mu_1}}{\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}} = \frac{1}{1 - \frac{v}{c}}, \\ \frac{\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}}{\sqrt{\varepsilon_1 \mu_1}} &= \frac{n_2}{n_1} = 1 - \frac{v}{c}. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Здесь $\varepsilon_{1,2}$ и $\mu_{1,2}$ – диэлектрическая и магнитная проницаемость метаматериала до и после временной границы, $n_{1,2}$ – его показатели преломления до и после временной границы. При этом $v > 0$, если объект приближается, и $v < 0$, если объект удаляется.

1. При $v > 0$ следует $1 - \frac{v}{c} < 1$, тогда получа-

ем неравенство $\varepsilon_2 \mu_2 < \varepsilon_1 \mu_1$, которое означает, что для имитации приближения объекта среда после временной границы должна стать оптически менее плотной. Мы предполагаем, что диэлектрическая и магнитная проницаемости метаматериала являются положительными величинами, $\varepsilon_{1,2} > 0$ и $\mu_{1,2} > 0$, поскольку частота волн не относится к области их сильного поглощения.

Таким образом, если нам известны свойства среды до временной границы ($\varepsilon_1 \mu_1$) и скорость объекта v , доплеровский сдвиг частоты для которого нужно имитировать, то по формуле (1.3) можно рассчитать $\varepsilon_2 \mu_2 = n^2$ (произведение величин, равное квадрату показателя преломления) для среды после временной границы. При этом в среде после временной границы распространяются две волны в направлениях $+z$ и $-z$ с частотой ω_2 .

2. При $v < 0$ (объект удаляется) имеем $1 - \frac{v}{c} > 1$, тогда верно неравенство $\varepsilon_2 \mu_2 > \varepsilon_1 \mu_1$, означающее, что для имитации удаляющегося объекта среда после временной границы должна стать оптически более плотной

$$\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2} = \left(1 - \frac{v}{c}\right) \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1}.$$

С учётом неравенства $v < 0$ эту формулу можно записать в виде

$$\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2} = \left(1 + \frac{|v|}{c}\right) \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1}. \quad (1.4)$$

В обобщенном случае формулы (1.3) и (1.4) можно записать в следующем виде:

$$\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2} = \left(1 \mp \frac{|v|}{c}\right) \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1}.$$

Здесь знак « $\rightarrow$ » выбирается для приближающегося объекта, а знак « $\leftarrow$ » для удаляющегося объекта.

Графики зависимости $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{1 \mp \frac{|v|}{c}}$ показаны

на рисунке 1.1, для знака « $\rightarrow$ » – красная штриховая кривая, для знака « $\leftarrow$ » – синяя сплошная кривая.

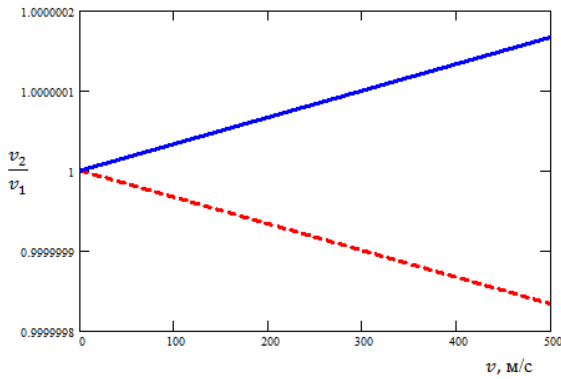


Рисунок 1.1 – Отношения фазовых скоростей волн в метаматериале после и до временной границы в зависимости от имитируемой скорости источника волн

2 Пример реализации метаматериала с временной границей

Допустим, до временной границы среда имела волновое сопротивление, равное волновому импедансу свободного пространства. Такой метаматериал, элементами которого являются планарные спирали (рисунок 2.1), спроектирован и изготовлен нами в рамках технологий печатных плат [9].

Для такого метаматериала относительная диэлектрическая и относительная магнитная проницаемости ε_{r1} и μ_{r1} имеют равные значения: $\mu_{r1} = \varepsilon_{r1}$. Поэтому для произвольного момента времени до временной границы можно записать

$$Z_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}} = \sqrt{\frac{\mu_{r1} \mu_0}{\varepsilon_{r1} \varepsilon_0}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = Z_0.$$

Здесь Z_1 – волновое сопротивление метаматериала до временной границы, Z_0 – волновое

сопротивление вакуума, ε_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные.

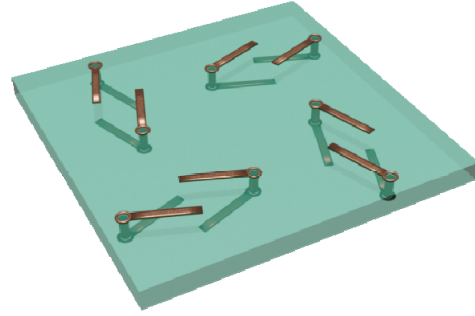


Рисунок 2.1 – Метаматериал, элементами которого являются планарные спирали

Для показателей преломления метаматериала до и после временной границы справедливы соотношения

$$n_1 = \sqrt{\varepsilon_{r1} \mu_{r1}} = \varepsilon_{r1}, \quad \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r2} \mu_{r2}}}{\varepsilon_{r1}} = 1 + \frac{|v|}{c}.$$

Как было указано выше, для имитации эффекта Доплера в случае удаляющегося объекта необходимо, чтобы $\sqrt{\varepsilon_{r2} \mu_{r2}} > \varepsilon_{r1}$, то есть среда после временной границы должна стать оптически более плотной. В случае имитации эффекта Доплера для приближающегося объекта должно выполняться соотношение

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r2} \mu_{r2}}}{\varepsilon_{r1}} = 1 - \frac{|v|}{c},$$

то есть метаматериал после временной границы должен стать оптически менее плотным.

Для изучения возможности имитации эффекта Доплера нам необходимо сравнить амплитуды отраженных волн для двух типов границ – пространственной и временной. Вначале рассмотрим пространственную границу двух полубесконечных сред – воздуха и метаматериала. Преобразование амплитуд волн на такой границе описывается соотношениями:

$$\frac{E_0^r}{E_0^i} = R^{(space)} = -\frac{1 - z_r}{1 + z_r}, \quad z_r = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}, \quad (2.1)$$

$$H = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \sqrt{\frac{\varepsilon_r}{\mu_r}} E, \quad \frac{E_0^\tau}{E_0^i} = T^{(space)} = \frac{2z_r}{1 + z_r},$$

$$S^i = S^r + S^\tau. \quad (2.2)$$

Здесь E_0 с верхними индексами i, r, τ – амплитуды падающей, отраженной и прошедшей волн, $R^{(space)}$ и $T^{(space)}$ – амплитудные коэффициенты отражения и прохождения волн на пространственной границе, z_r – относительный

волновой импеданс метаматериала, S с индексами i, r, τ – модуль вектора Пойнтинга для падающей, отражённой и прошедшей волн.

Из формулы (2.2) следует, что на пространственной границе выполняется баланс потоков энергии для этих волн.

Проведем сравнение двух типов границ (временной и пространственной), частично используя результаты статьи [7]. Амплитудный коэффициент отражения волны $R^{(time)}$ для временной границы можно записать в виде:

$$R^{(time)} = \frac{E_{02R}}{E_{01}} = \frac{1}{2} \frac{v_2}{v_1} \left(\frac{z_{r2}}{z_{r1}} - 1 \right) = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}\mu_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r2}\mu_{r2}}} \left(\frac{z_{r2}}{z_{r1}} - 1 \right). \quad (2.3)$$

Здесь E_{01} – амплитуда волны до временной границы, E_{02R} – амплитуда волны, отраженной от временной границы. Формулу (2.3) можно преобразовать и сравнить с коэффициентом отражения волны (2.1) на пространственной границе:

$$R^{(time)} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}\mu_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r2}\mu_{r2}}} \left(\sqrt{\frac{\mu_{r2}}{\epsilon_{r2}}} \sqrt{\frac{\epsilon_{r1}}{\mu_{r1}}} - 1 \right),$$

$$R^{(space)} = -\frac{1 - z_r}{1 + z_r} = -\frac{1 - \sqrt{\frac{\mu_{r2}}{\epsilon_{r2}}}}{1 + \sqrt{\frac{\mu_{r2}}{\epsilon_{r2}}}}.$$

Допустим, первая среда (метаматериал до временной границы) была согласована по импедансу со свободным пространством, тогда для согласованной с вакуумом среды при $t < t_0$ имеем $\epsilon_{r1} = \mu_{r1}$, где t_0 – момент времени, в который создается временная граница. Следовательно, получаем

$$R^{(time)} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_{r1}}{\sqrt{\epsilon_{r2}\mu_{r2}}} \left(\sqrt{\frac{\mu_{r2}}{\epsilon_{r2}}} - 1 \right).$$

Предлагается использовать варикапы (варакторы) с целью управления параметрами мета-атомов или микрорезонаторов. Для исследуемой метаповерхности такими мета-атомами являются планарные спирали. Варикапы характеризуются емкостью, которая может быть изменена в некотором диапазоне, при этом индуктивность варикапов имеет малые значения. В результате соединения варикапов с планарными спиралями происходит изменение емкости отдельных элементов и метаповерхности в целом без значительного изменения индуктивности. Следовательно, при управлении параметрами резонаторов с помощью варикапов, мы можем

изменять относительную диэлектрическую проницаемость метаматериала ϵ_r , а его относительная магнитная проницаемость μ_r при этом остаётся постоянной. Таким образом, выполняются соотношения

$$\epsilon_{r2} \neq \epsilon_{r1}, \quad \mu_{r2} = \mu_{r1} = \epsilon_{r1}, \quad (2.4)$$

тогда получаем

$$R^{(time)} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_{r1}}{\sqrt{\epsilon_{r2}\epsilon_{r1}}} \left(\sqrt{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}} - 1 \right) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}} \left(\sqrt{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}} - 1 \right).$$

При тех же условиях (2.4) находим коэффициент отражения волн от пространственной границы и отношение коэффициентов отражения для границ двух типов:

$$R^{(space)} = -\frac{1 - \sqrt{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}}}{1 + \sqrt{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}}},$$

$$\frac{R^{(time)}}{R^{(space)}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}} \left(1 + \sqrt{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}} \right).$$

Сравним также коэффициенты прохождения волн для границ двух типов $T^{(time)}$ и $T^{(space)}$. Сначала вычисляем коэффициент прохождения волн для временной границы

$$T^{(time)} = \frac{1}{2} \frac{v_2}{v_1} \left(\frac{z_2}{z_1} + 1 \right) = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}\mu_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r2}\mu_{r2}}} \left(\frac{z_{r2}}{z_{r1}} + 1 \right).$$

Тогда при выполнении соотношений (2.4) имеем

$$T^{(time)} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}} \left(\sqrt{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}} + 1 \right),$$

$$T^{(space)} = \frac{2z_r}{1 + z_r} = \frac{2\sqrt{\frac{\mu_{r2}}{\epsilon_{r2}}}}{1 + \sqrt{\frac{\mu_{r2}}{\epsilon_{r2}}}} = \frac{2\sqrt{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}}}{1 + \sqrt{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}}}.$$

Теперь находим отношение коэффициентов прохождения волн для границ двух типов:

$$\frac{T^{(time)}}{T^{(space)}} = \frac{1}{4} \left(\sqrt{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}} + 1 \right)^2.$$

Рассмотрим возможные случаи, обусловленные видом подключения варикапа к микрорезонатору (в частности, к планарной спирали).

1. Допустим, $\epsilon_{r2} > \epsilon_{r1}$. Этого можно достичь при параллельном подключении варикапа к микрорезонатору (к планарной спирали), такое соединение приводит к увеличению емкости

метаматериала. Тогда $\frac{R^{(time)}}{R^{(space)}} < 1$, $\frac{T^{(time)}}{T^{(space)}} < 1$, то есть преобразование волн на пространственной границе более сильное, чем на временной границе.

2. Допустим, что $\varepsilon_{r2} < \varepsilon_{r1}$, этого можно достичь при последовательном подключении варикапа к микрорезонатору (к планарной спирали), при таком соединении емкость метаматериала уменьшается. Тогда $\frac{R^{(time)}}{R^{(space)}} > 1$, $\frac{T^{(time)}}{T^{(space)}} > 1$.

Теперь преобразование волн на временной границе более сильное, чем на пространственной границе.

Управление варикапами должно осуществляться синхронно по всей поверхности (для создания единой временной границы) либо поэлементно (для формирования пространственно-временных модуляционных паттернов).

При имитации эффекта Доплера с помощью метаповерхности происходит отражение электромагнитной волны с измененной частотой относительно падающей волны. Сдвиг угловой частоты отраженной волны $\omega_m = \omega_1 - \omega_0$ удовлетворяет соотношению, приведенному в статье [10]

$$\omega_m = 2\beta\gamma\omega_0, \quad (2.5)$$

где $\omega_0 = 2\pi\nu_0$ – угловая частота падающей волны, ν_0 – частота падающей волны, $\omega_1 = 2\pi\nu_1$ – угловая частота отраженной волны, ν_1 – частота отраженной волны, $\beta = \frac{v}{c}$ – скорость объекта

относительно скорости света, $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$, v –

имитируемая скорость движения объекта, c – скорость света в вакууме. Из формулы (2.5) получаем выражение для нормированной скорости объекта

$$\beta = \frac{\omega_m}{\omega_0} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\omega_m}{\omega_0}\right)^2 + 4}}. \quad (2.6)$$

Например, при частоте падающей волны $\nu_0 = 4,75$ ГГц и частоте отраженной волны $\nu_1 = 5,25$ ГГц из формулы (2.6) получаем $\beta = 5,3 \cdot 10^{-2}$. Вычисления показывают, что значения β соответствуют графику 4b, приведенному в статье [10].

В статье [11] проведено моделирование имитации доплеровского сдвига частоты с помощью высоко-импедансной метаповерхности, содержащей прямоугольные патчи с варикапами (варакторами). При частоте падающей волны $\nu_0 = 5$ ГГц имеет место сдвиг частоты отраженной

волны $\delta\nu = 1$ МГц, что соответствует относительной скорости объекта $\beta = 10^{-4}$. Таким образом, использование метаповерхностей на основе планарных спиралей и варакторов позволяет получить более значительный сдвиг частоты отраженной волны, который соответствует имитации более высокой скорости объекта.

В указанной статье [11] при моделировании высоко-импедансной метаповерхности с прямоугольными патчами варикапы управлялись низкочастотным переменным напряжением, что позволило получить имитацию эффекта Доплера. При моделировании предложенной нами метаповерхности на основе планарных спиралей рассматриваются варикапы при управляемом постоянном напряжении. При изменении напряжения и, соответственно, емкости варикапов происходит изменение резонансной частоты отраженной волны. Поэтому предложенная нами метаповерхность на основе планарных спиралей может быть использована также при создании управляемого фильтра частоты отраженной волны.

Заключение

В работе изложены теоретические основы имитации эффекта Доплера за счёт создания временной границы в метаматериале. Показано, что скачкообразное изменение электромагнитных параметров среды (диэлектрической и магнитной проницаемостей) в некоторый момент времени приводит к преобразованию частоты отраженной и проходящей волны, что формально эквивалентно доплеровскому сдвигу частоты при движении источника волн относительно неподвижного приёмника. Установлена связь между отношением фазовых скоростей волн до и после временной границы и имитируемой скоростью источника.

Рассмотрен метаматериал на основе планарных спиралей и варикапов, который до временной границы имеет волновое сопротивление, равное импедансу свободного пространства.

Получены выражения для амплитудных коэффициентов отражения и прохождения на временной границе, проведено их сравнение с соответствующими коэффициентами для пространственной границы раздела двух сред.

Показано, что при последовательном подключении варикапов к микрорезонаторам преобразование волн на временной границе оказывается более сильным, чем на пространственной границе. Напротив, при параллельном подключении варикапов пространственная граница обеспечивает более эффективное преобразование.

Таким образом, предложенный подход позволяет имитировать как приближение, так и удаление объекта посредством управления диэлектрической проницаемостью метаматериала во времени, что открывает возможности для

создания устройств, неотличимых для доплеровских радаров от реально движущихся объектов.

Полученные теоретические результаты могут быть использованы при разработке систем радиомаскировки и радиоэлектронной борьбы. В частности, на основе временных границ в метаматериалах возможно создание адаптивных покрытий для беспилотных летательных аппаратов, наземной техники и морских объектов, которые имитируют доплеровский сдвиг частоты, характерный для ложной скорости цели – приближающейся или удаляющейся. Для практической реализации предлагается использовать метаповерхности с планарными спиральными резонаторами, в цепь которых включены варикапы.

Рекомендуется проведение экспериментальной верификации на макетах метаматериалов в СВЧ-диапазоне с последующим масштабированием на более высокие частоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials* / T. J. Cui, M. Q. Qi, X. Wan [et al.] // *Light: science & applications*. – 2014. – Vol. 3, № 10. – P. e218-e218.
2. *Electromagnetic reprogrammable coding-metamaterial surface holograms* / L. Li, T. Jun Cui, W. Ji [et al.] // *Nature communications*. – 2017. – Vol. 8, № 1. – P. 197.
3. *Space-time-coding digital metasurfaces* / L. Zhang, X. Q. Chen, S. Liu [et al.] // *Nature communications*. – 2018. – Vol. 9, № 1. – P. 4334.
4. *Two-dimensional beam steering using an electrically tunable impedance surface* / D. F. Sievenpiper, J. H. Schaffner, H. J. Song [et al.] // *IEEE Transactions on antennas and propagation*. – 2003. – Vol. 51, № 10. – P. 2713–2722.
5. *Smart metasurface with self-adaptively reprogrammable functions* / Q. Ma, G. D. Bai, H. B. Jing [et al.] // *Light: science & applications*. – 2019. – Vol. 8, № 1. – P. 98.
6. *Autonomous aeroamphibious invisibility cloak with stochastic-evolution learning* / C. Qian,

Y. Jia, Z. Wang [et al.] // *Advanced Photonics*. – 2024. – Vol. 6, № 1. – P. 016001.

7. *Temporal interfaces in complex electromagnetic materials: an overview* / M. H. Mostafa, M. S. Mirmoosa, M. S. Sidorenko [et al.] // *Optical Materials Express*. – 2024. – Vol. 14, № 5. – P. 1103–1127.

8. *Morgenthaler, F. R. Velocity modulation of electromagnetic waves* / F. R. Morgenthaler // *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* – 1958. – № 6 (2). – P. 167–172.

9. *Selective Manipulation of Microwaves by a Cascade of Independent Metasurfaces Based on Planar Spirals* / I. Fanyayev, A. Samofalov, A. Kravchenko [et al.] // *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*. – 2025. – Vol. 2025, № 1. – P. 2346639.

10. *Doppler cloak restores invisibility to objects in relativistic motion* / D. Ramaccia, D. L. Sounas, A. Alu [et al.] // *Physical Review B*. – 2017. – Vol. 95, № 7. – P. 075113.

11. *Doppler cloak: Concept and realistic implementation through space-time modulated metamaterials and time-modulated metasurfaces* / D. Ramaccia, A. Alu, A. Toscano [et al.] // 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – IEEE, 2020. – P. 1–3.

Работа выполнена в рамках проектов БРФФИ №Ф24КИТГ-005 и Ф25КИ-034.

Поступила в редакцию 16.03.2026.

Информация об авторах

Семченко Игорь Валентинович – д.ф.-м.н., профессор, чл.-корр. НАН Беларуси
 Фаняев Иван Александрович – к.т.н., доцент
 Самофалов Андрей Леонидович – к.ф.-м.н., доцент
 Сомов Павел Владиславович – старший преподаватель
 Евсеевич Михаил Юрьевич – младший научный сотрудник
 Хахомов Сергей Анатольевич – д.ф.-м.н., доцент
 Цзихун Гу – доктор инженерии, профессор
 Даши Динг – доктор инженерии, профессор