

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.21>

УДК: 535.13

ФОКУСИРОВКА МОНОПОЛЯРНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА ДВУМЕРНЫМ ПАРАБОЛИЧЕСКИМ ЗЕРКАЛОМ

В.Н. Корниенко, В.В. Кулагин

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп.7

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2023 г.

Аннотация. При помощи методов вычислительного эксперимента проведено исследование процесса фокусировки монополярного электромагнитного импульса цилиндрическим параболоидом. Показано, что поле монополярного импульса с плоским волновым фронтом, отраженного и прошедшего через фокус цилиндрического параболоида становится биполярным, причем зависимость напряженности поля от времени оказывается пропорциональной временной производной поля падающего импульса.

Ключевые слова: монополярный электромагнитный импульс, фокусировка.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Автор для переписки: Корниенко Владимир Николаевич korn@cplire.ru

Введение

Проблеме генерации сверхкоротких электромагнитных импульсов в различных частотных диапазонах всегда уделялось повышенное внимание. В последнее время появился целый ряд научных работ, посвященных формированию импульсов электромагнитного поля, длительность которых может быть меньше периода колебаний (см., например, [1]), или монополярных электромагнитных импульсов (МЭМИ). Отметим, что термин «монополярный импульс» не является устоявшимся, в литературе встречается также термин

«униполярный импульс». Обзор возможных методов получения МЭМИ приведен, в частности, в [2].

К настоящему моменту описано несколько способов генерации МЭМИ, длительность которых соответствует СВЧ-диапазону. Так, в [3] проведено теоретическое исследование структуры поля излучения, формируемого пространственно коротким локализованным током, временная зависимость которого имеет крутые передний и задний фронты. Показано, что при этом в свободном пространстве формируется пара МЭМИ противоположной полярности. Расстояние между этими МЭМИ определяется временем, в течение которого ток имеет постоянное значение.

Возможность генерации МЭМИ была продемонстрирована также в ряде вычислительных экспериментов [4, 5]. В этих работах источником монополярных импульсов выступал плоский короткий сгусток релятивистских электронов, который падал наклонно на тонкую металлическую фольгу. Электроны, обладающие значительной кинетической энергией, преодолевали данное препятствие, в то время как для электромагнитного поля фольга была непрозрачной. В результате на внешней по отношению к направлению падения сгустка поверхности металла образовывался локализованный в пространстве и перемещающийся с течением времени вдоль фольги поверхностный ток, который и был источником МЭМИ. Обратим внимание на то, что скорость движения указанного тока вдоль проводящей поверхности превышала скорость света в вакууме.

Монополярные импульсы, распространяющиеся в свободном пространстве, могут найти свое практическое применение в различных областях науки [6], техники [7], медицины [8] и т.д. В связи с этим актуальной представляется задача о возможности фокусировки МЭМИ в заданной точке пространства с сохранением его основного качества - монополярности. Подходы к решению этой проблемы изложены в целом ряде публикаций. Так, в [9, 10] проведено теоретическое исследование дифракции МЭМИ на идеально проводящем цилиндре. Показано, что структура поля зависит от поляризации

падающего импульса, а именно, монополярность сохраняется только в том случае, если МЭМИ имеет единственную отличную от нуля электрическую составляющую, которая параллельна оси цилиндра.

Целью данной работы являлся анализ структуры поля при фокусировке МЭМИ с плоским фронтом цилиндрическим параболическим зеркалом.

1. Постановка задачи

Рассмотрим двумерную область G свободного пространства, положение которой совпадает с плоскостью XOY декартовой системы координат. Эта область содержит идеально проводящую поверхность в виде параболы, вершина которой находится на продольной оси X . Парабола имеет конечные размеры и развернута в сторону отрицательных значений этой оси (рис. 1).

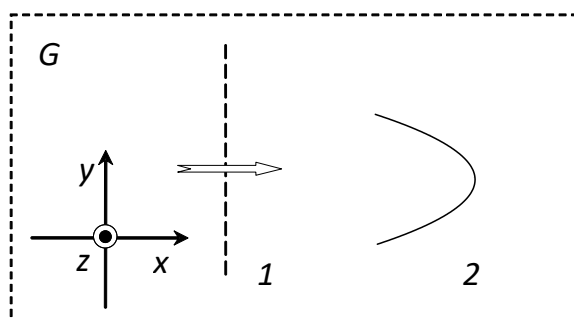


Рис. 1. Конфигурация рассматриваемой области: 1 – падающий импульс; 2 – параболическое зеркало конечных размеров.

Монополярный электромагнитный импульс, который имеет плоский фронт, параллельный оси Y , распространяется от левого края G в положительном направлении оси X . Пространственно-временной профиль МЭМИ аналогичен рассмотренному в [9], а именно, поле МЭМИ сначала возрастает по квадратичному закону, затем, после достижения максимального значения, экспоненциально убывает:

$$E_y(x, y, t) = \begin{cases} 0, & \frac{t - (x - x_0)}{c} < 0 \\ \alpha_0(t - (x - x_0)/c)^2 \exp(-\beta(t - (x - x_0)/c)), & \frac{t - (x - x_0)}{c} \geq 0 \end{cases}, \quad (1)$$

$$H_z = -E_y,$$

где α_0 – амплитуда МЭМИ; x_0 – положение фронта импульса при $t = 0$; β – коэффициент, определяющий длительность импульса.

Динамику электромагнитного поля будем исследовать при помощи системы уравнений Максвелла в пространственно-временном представлении в дифференциальной форме. Покомпонентная запись этой системы для рассматриваемого случая имеет следующий вид:

$$\frac{\partial H_z(x, y, t)}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \left\{ \frac{\partial E_y(x, y, t)}{\partial x} - \frac{\partial E_x(x, y, t)}{\partial y} \right\}, \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial E_x(x, y, t)}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\partial H_z(x, y, t)}{\partial y}, \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial E_y(x, y, t)}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\partial H_z(x, y, t)}{\partial x}. \quad (2.3)$$

На верхней, нижней и правой границах области G действуют условия излучения, т.е. отражение электромагнитных волн от этих границ отсутствует. Временная зависимость поперечной составляющей электрического поля на левой границе, положение которой соответствует координате x_0 , задано выражением (1). В начальный момент времени $E_y(x, y, 0) = 0$, $H_z(x, y, 0) = 0$ для всех $x, y \in G$.

Решение системы уравнений (2) с соответствующими поставленной задаче начальными и граничными условиями будем проводить численным методом, который основан на конечно-разностном подходе. Отметим, что отсутствие отражения волн от соответствующих границ G достигается использованием так называемых идеально согласованных слоев (в англоязычной литературе *perfectly matched layers – PML*) [11].

Для анализа структуры поля используем зависимости магнитной компоненты от продольной координаты в фиксированные моменты времени на прямой, совпадающей с осью X выбранной системы координат. Для удобства нормируем время на длительность МЭМИ τ , рассчитанную по половине амплитуды исходного импульса. Пространственные координаты нормируем на величину $c\tau$.

2. Результаты моделирования

Были рассмотрены случаи, когда глубина зеркала многократно превышала пространственную длину падающего МЭМИ, а именно при апертуре зеркала 100 ст его глубина изменялась от 45 до 55 ст . Это позволило отделить поле МЭМИ от поля цилиндрических волн, которые формируются за счет дифракции на краях апертуры зеркала. В проведенных вычислительных экспериментах изменяемым параметром было фокусное расстояние параболы. Длительность МЭМИ была фиксирована. Во всех случаях динамика поля качественно совпадала.

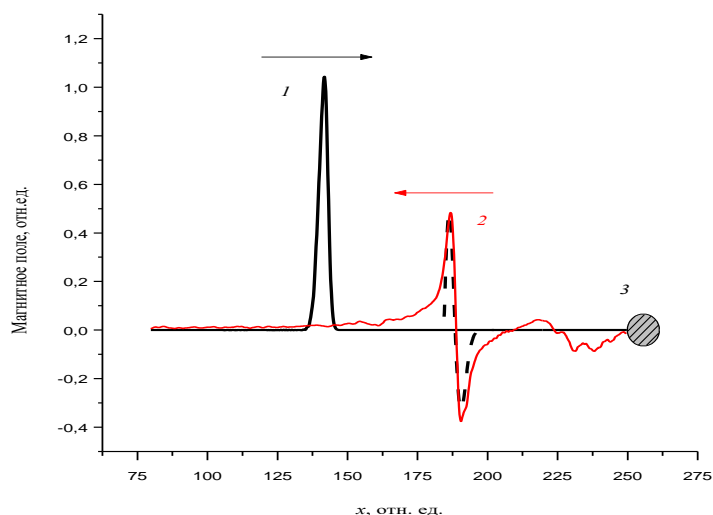


Рис. 2. Зависимость магнитного поля на оси системы в различные моменты времени.

На рис. 2. изображены зависимости магнитного поля в два момента времени: когда падающий МЭМИ (кривая 1) еще не прошел точку фокуса параболы (заштрихованный круг 3), и когда импульс, отразившись полностью от поверхности зеркала, прошел точку фокуса (кривая 2).

Стрелками указаны направления распространения импульсов.

Как видно из приведенных зависимостей, импульс 2 – биполярный. Более того, его форма соответствует форме производной по времени падающего МЭМИ, которая изображена на рисунке штриховой линией.

Заключение

Таким образом, на примере цилиндрического параболоида показано, что двумерные фокусирующие системы приводят к изменению не только пространственной, но и временной структуры МЭМИ, превращая его при фокусировке из монополярного в биполярный импульс.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Литература

1. Fedorov V.M. et al. High power radiators of ultra-short electromagnetic quasi-unipolar pulses //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Т. 830. – №. 1. – С. 012020.
2. Архипов Р.М., Архипов М.В., Розанов Н.Н. Униполярный свет: существование, получение, распространение, воздействие на микрообъекты //Квантовая электроника. – 2020. – Т. 50. – №. 9. – С. 801-815.
3. Корниенко В.Н., Румянцев Д.Р., Черепенин В.А. Особенности излучения пары монополярных электромагнитных импульсов в свободное пространство и характера их взаимодействия с модельной средой //Журнал радиоэлектроники. – 2017. – №. 3. – С. 1-6.
4. Wu H. C., Meyer-ter-Vehn J. Giant half-cycle attosecond pulses //Nature Photonics. – 2012. – Т. 6. – №. 5. – С. 304-307.
5. Xu J. et al. Terawatt-scale optical half-cycle attosecond pulses //Scientific Reports. – 2018. – Т. 8. – №. 1. – С. 2669.
6. Popolitova D.V. et al. Unipolar magnetic field pulses as an advantageous tool for ultrafast spin-flip in superconducting Josephson “atoms” //Beilstein Archives. – 2019. – Т. 2019. – №. 1. – С. 3.
7. Nenovski P. Underground current impulses as a possible source of unipolar magnetic pulses //Acta Geodaetica et Geophysica. – 2018. – Т. 53. – С. 555-577.

8. Jiang Y. et al. A unipolar pulse electromagnetic field apparatus for magnetic therapy //IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. – 2018. – Т. 21. – №. 5. – С. 41-48.
9. Корниенко В.Н., Кулагин В.В. Нестационарная дифракция ТМ-поляризованного монополярного импульса на идеально проводящем цилиндре // Известия РАН. Серия физическая. – 2021. – Т.85. – №. 1 – С. 64-67.
10. Корниенко В.Н., Кулагин В.В., Гупта Д.Н. Рассеяние монополярного ТЕ-поляризованного электромагнитного импульса на идеально проводящем цилиндре //Радиотехника и электроника. – 2021. – Т. 66. – №. 7. – С. 644-648.
11. Taflove A. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. Artech House, Boston, London, 1995

Для цитирования:

Корниенко В.Н., Кулагин В.В. Фокусировка монополярного электромагнитного импульса двумерным параболическим зеркалом. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.21>