

09  
**Получение униполярных импульсов в дальней зоне источника**

© М.В. Архипов<sup>1</sup>, Р.М. Архипов<sup>1</sup>, Н.Н. Розанов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,  
199034 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

e-mail: m.arkhipov@spbu.ru, arkhipovrostislav@gmail.com, nnrosanov@mail.ru

Поступила в редакцию 27.05.2021 г.

В окончательной редакции 27.05.2021 г.

Принята к публикации 07.06.2021 г.

При распространении импульсов негармонической формы в пустом пространстве зависимость напряженности поля от времени изменяется. В дальней зоне или при фокусировке излучения в точке фокуса напряженность поля становится пропорциональной производной по времени от поля источника. Если исходное поле униполярно, то дифференцирование приведет к потере униполярности. На основании этих рассуждений обычно делают вывод о крайне ограниченном практическом использовании излучения униполярных источников, поскольку всякое распространение и фокусировка подобного излучения приведут к потере униполярности. Однако это ограничение не влияет на ситуации, когда зависимость поля от времени имеет специальный вид. Приведены условия, при которых получение униполярных импульсов в дальней зоне возможно.

**Ключевые слова:** униполярные импульсы, предельно короткие импульсы, дальняя зона, дифракция, фокусировка.

DOI: 10.21883/OS.2021.09.51345.2342-21

Несмотря на принципиальную возможность существования импульсов униполярного излучения в оптическом и смежных диапазонах, до недавнего времени интерес к получению и применению подобного излучения отсутствовал. По мере сокращения длительностей импульсов, переходу от фемто- к аттосекундному диапазону их длительностей встал вопрос о получении субцикловых импульсов, содержащих менее одного периода колебаний поля [1,2]. И стали обсуждаться вопросы, связанные с униполярностью и электрической площадью импульсов. Рассмотрение этих вопросов проведено в обзорах [3,4] и монографии [5].

Практическая ценность униполярных импульсов в отличие от привычных биполярных импульсов, содержащих несколько циклов колебаний, видится в их способности однонаправленного воздействия на заряды, что позволяет, например, за более короткие времена нерезонансно возбуждать/девозбудить квантовые системы [1,6–8] и ускорять свободные заряды [9], см. также и другие применения в обзоре [4] и цитируемой в нем литературе. Однако известно, что при распространении униполярных импульсов в пустом пространстве или их фокусировке происходит потеря униполярности [10–12].

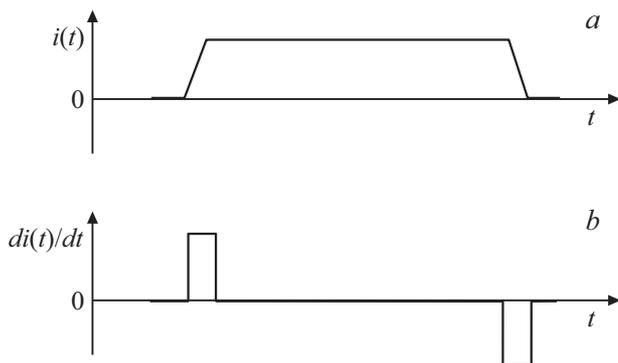
Этот факт часто используется как аргумент в дискуссиях, показывающий малую практическую ценность работ по получению таких импульсов. Невозможность сохранить униполярность при удалении от источника, а также невозможность сконцентрировать излучение в малой области пространства для реализации высокой пиковой амплитуды поля ставит под вопрос перспективы

применения униполярных импульсов. Соответственно целью настоящей работы является иллюстрация возможности получения униполярных импульсов в дальней зоне источника.

Отметим сначала два момента. Во-первых, электрическая площадь излучения зарядов в вакууме обращается в нуль, если и только если во всех точках пространства интегральная по времени плотность заряда равна нулю [13].

Во-вторых, строгая униполярность не является необходимым фактором для реализации тех преимуществ, которые дает полная униполярность перед биполярным импульсом. Наличие у импульса длинного фронта с противоположным направлением напряженности поля, разнесение двух униполярных импульсов с разной полярностью во времени позволяет применять такое излучение так же эффективно, как униполярное [7,8]. Этот вывод качественно подтверждается экспериментальными исследованиями, проведенными в работе [1], в которой показано, что субцикловые импульсы, содержащие длинный фронт противоположной полярности, более эффективно возбуждают атомную систему, чем одноцикловые импульсы.

Получить излучение, содержащее либо один всплеск напряженности поля с большой амплитудой и малой длительностью с длинным фронтом малой амплитуды либо два разнесенных во времени униполярных импульса противоположной полярности в дальней зоне от источника (или при фокусировке) можно, если источник излучения (ближняя зона) имеет специальный времен-



Импульс тока трапецеидальной формы (а) и его производная (b).

ной профиль. Подобные импульсы имеют применение в радиолокации и радиосвязи несинусоидальных волн [14].

Идею получения несинусоидальных униполярных волн иллюстрирует рисунок. Здесь ток в антенне передатчика радиолокатора имеет трапецеидальную зависимость от времени (рис., а). Напряженность электрического поля  $E$  излучения, порождаемого током с плотностью током  $j$ , описывается волновым уравнением, решение которого (запаздывающие потенциалы) в дальней зоне (на расстоянии  $R_0$  от излучателей) имеет вид [15]

$$E = -\frac{1}{c^2 R_0} \int \frac{\partial j}{\partial t} \Big|_{t-R/c} dV. \quad (1)$$

При этом в ближней зоне, в которой дифракция проявляется слабо и оправдано плосковолновое рассмотрение, напряженность генерируемого источником поля пропорциональна току [4,16,17]:

$$E(z, t) = -\frac{2\pi}{c} \int_{z_1}^{z_2} j \left( z', t - \frac{|z - z'|}{c} \right) dz'. \quad (2)$$

Здесь интегрирование ведется по слою, который заключен между точками с координатами  $z_1$  и  $z_2$ .

Согласно (1), в дальней зоне или при фокусировке напряженность поля будет пропорциональна производной тока. Тем самым поле в дальней зоне будет иметь вид двух разнесенных во времени униполярных импульсов с противоположными направлениями напряженности поля (рис. b). Их длительность будет равна длительности переднего и заднего фронтов трапецеидального импульса. В обзоре [4] также был дан пример формирования поля ускорившего заряда, затем движущегося равномерно и замедляющегося до полной остановки, что приводит к появлению двух коротких импульсов в дальней зоне. Если бы заряд не остановился, то мы получили бы строго униполярный импульс в дальней зоне и при фокусировке. Физическая ситуация аналогична изображенной на рисунке. Ряд других предложений по получению униполярных импульсов прямоугольной и трапецеидальной форм изложен в [18–21].

Обратим внимание, что при получении очень коротких импульсов при облучении лазерным излучением различных мишеней [22–25] источником излучения является ускоренное направленное движение электронов, т.е. импульс тока в заданных условиях эксперимента направлении. Если он имеет крутой фронт и более медленное затухание, то в дальней зоне или при фокусировке мы получим субцикловый импульс с длинным фронтом противоположной полярности.

Таким образом, если требуется достижение униполярных свойств излучения при фокусировке или распространении униполярного излучения в пустом пространстве на значительные расстояния, то это решается за счет реализации соответствующей формы импульса в ближней зоне источника. Напомним также, что униполярные импульсы могут транспортироваться в коаксиальных волноводах [26].

### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов 20-32-70049 (проблема получения униполярных импульсов) и 19-02-00312 (проблема изменения электрической площади при распространении предельно коротких импульсов).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Hassan M.T., Luu T.T., Moulet A., Raskazovskaya O., Zhokhov P., Garg M., Karpowicz N., Zheltikov A.M., Pervak V., Krausz F., Goulielmakis E. // Nature. 2016. V. 530. P. 66.
- [2] Rossi G.M., Mainz R.E., Yang Y., Scheiba F., Silva-Toledo M.A., Chia S.H., Keathley P.D., Fang S., Mücke O.D., Manzoni C., Cerullo G., Cirri G., Kärtner F.X. // Nature Photonics. 2020. V. 14 (10). P. 629–635.
- [3] Розанов Н.Н., Архипов Р.М., Архипов М.В. // УФН. 2018. Т. 188. № 12. С. 1347; Rosanov N.N., Arkhipov R.M., Arkhipov M.V. // Phys. Usp. 2018. V. 61. N 12. P. 1227.
- [4] Архипов Р.М., Архипов М.В., Розанов Н.Н. // Квант. электрон. 2020. Т. 50. № 9. С. 801–815; Arkhipov R.M., Arkhipov M.V., Rosanov N.N. // Quant. Electron. 2020. V. 50. N 9. P. 801–815.
- [5] Розанов Н.Н. Диссипативные оптические и родственные солитоны. М.: Физматлит, 2021.
- [6] Arkhipov R.M., Arkhipov M.V., Babushkin I., Demircan A., Morgner U., Rosanov N.N. // Opt. Lett. 2019. V. 44. N 5. P. 1202.
- [7] Архипов Р.М., Архипов М.В., Пахомов А.В., Розанов Н.Н. // Опт. и спектр. 2020. Т. 128. В. 1. С. 106–109; Arkhipov R.M., Arkhipov M.V., Pakhomov A.V., Rosanov N.N. // Opt. Spectrosc. 2020. V. 128. N 1. P. 102–105.

- [8] *Arkhipov R., Pakhomov A., Arkhipov M., Demircan A., Morgner U., Rosanov N., Babushkin I.* // Opt. Express. 2020. V. 28. N 11. P. 17020–17034.
- [9] *Розанов Н.Н., Высотина Н.В.* // ЖЭТФ. 2020. Т. 157. № 1. С. 63–66; *Rosanov N.N., Vysotina N.V.* // JETP. 2020. V. 130. N 1. P. 52–55.
- [10] *Розанов Н.Н.* // Опт. и спектр. 2003. Т. 95. С. 318; *Rozaonov N.N.* // Opt. Spectrosc. 2003. V. 95. P. 299.
- [11] *You D., Bucksbaum P.H.* // J. Opt. Soc. Am. B. 1997. V. 14. P. 1651.
- [12] *Karlan A.E.* // J. Opt. Soc. Am. B. 1998. V. 15. P. 951.
- [13] *Розанов Н.Н.* // Опт. и спектр. 2020. Т. 128. С. 95; *Rosanov N.N.* // Opt. Spectrosc. 2020. V. 128. P. 92.
- [14] *Хармут Х.Ф.* Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи. М.: Радио и связь, 1985; *Harmuth H.F.* Nonsinusoidal Waves for Radar and Radio Communication. NY: Acad. Press, 1981.
- [15] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория поля. М.: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988; *Landau L.D., Lifshitz E.M.* The Classical Theory of Fields. Butterworth-Heinemann: Oxford, 1975.
- [16] *Arkhipov M.V., Arkhipov R.M., Pakhomov A.V., Babushkin I.V., Demircan A., Morgner U., Rosanov N.N.* // Opt. Lett. 2017. V. 42. P. 2189.
- [17] *Пахомов А.В., Архипов Р.М., Архипов М.В., Бабушкин И., Розанов Н.Н.* // Опт. и спектр. 2017. Т. 123. С. 901; *Pakhomov A.V., Arkhipov R.M., Arkhipov M.V., Babushkin I., Rosanov N.N.* // Opt. Spectrosc. 2017. V. 123. P. 913.
- [18] *Arkhipov R.M., Arkhipov M.V., Belov P.A., Tolmachev Yu.A., Babushkin I.* // Las. Phys. Lett. 2016. V. 13. N 4. P. 046001.
- [19] *Arkhipov R.M., Pakhomov A.V., Babushkin I.V., Arkhipov M.V., Tolmachev Yu.A., Rosanov N.N.* // J. Opt. Soc. Am. B. 2016. V. 33. N 12. P. 2518–2524.
- [20] *Pakhomov A.V., Arkhipov R.M., Babushkin I.V., Arkhipov M.V., Tolmachev Yu.A., Rosanov N.N.* // Phys. Rev. A. 2017. V. 95. N 1. P. 013804.
- [21] *Pakhomov A.V., Arkhipov R.M., Arkhipov M.V., Demircan A., Morgner U., Rosanov N.N., Babushkin I.* // Sci. Rep. 2019. V. 9. Article Number 7444.
- [22] *Gao Y., Drake T., Chen Z., De Camp M.F.* // Opt. Lett. 2008. V. 33. P. 2776.
- [23] *Xu J., Shen B., Zhang X., Shi Y., Ji L., Zhang L., Xu T., Wang W., Zhao X., Xu Z.* // Sci. Rep. 2018. V. 8. P. 2669.
- [24] *Fülöp J.A., Tzortzakakis S., Kampfrath T.* // Adv. Opt. Mater. 2020. V. 8. P. 1900681.
- [25] *Shou Y., Hu R., Gong Z., Yu J., Chen J., Mourou G., Yan X., Ma W.* // New J. Phys. 2021. V. 23. N 5. P. 053003.
- [26] *Розанов Н.Н.* // Опт. и спектр. 2019. Т. 127. С. 960; *Rosanov N.N.* // Opt. Spectrosc. 2019. V. 127. P. 1050.