УДК 537.523.4 DOI: 10.62955/0135-3748-2024-114

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МОЛНИЕВЫХ РАЗРЯДОВ

И.М. Вершинин, И.Ю. Зудин, М.Е. Гущин, П.А. Микрюков, Ю.В. Шлюгаев, А.А. Истомин

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия, i.vershinin@ipfran.ru

LABORATORY MODELING OF PULSED ELECTROMAGNETIC RADIATION OF LIGHTNING DISCHARGES

I.M. Vershinin, I.Yu. Zudin, M.E. Gushchin, P.A. Mikryukov, Yu.V. Shlyugaev, A.A. Istomin

Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhny Novgorod, Russia

Аннотация. В настоящем докладе приводятся результаты экспериментального исследования параметров нано- и субнаносекундных импульсов, генерируемых положительным искровым разрядом длиной 1,3 м на генераторе Маркса с рабочим напряжением около 1 МВ. С помощью комплекта специальных импульсных электрических и магнитных датчиков и синхронной скоростной фотосъемкой удалось зарегистрировать волновые формы импульсного излучения, связать моменты его появления с фазами разряда. Излучение имеет вид одиночного сверхширокополосного электромагнитного импульса (СШП ЭМИ) длительностью около 0,5 нс и временем нарастания фронта около 200 пс. При помощи оригинальной схемы измерений выполнена пространственная локализация источника СВЧ излучения.

Ключевые слова: сверхширокополосный электромагнитный импульс, высоковольтный разряд, пробой воздуха, распространение стримеров, лабораторное моделирование

Abstract. This report presents the results of an experimental study of the parameters of nano- and subnanosecond pulses generated by a positive spark discharge of 1.3 m long on a Marx generator with an operating voltage of about 1 MV. Using a set of special pulsed electrical and magnetic sensors and synchronous high-speed photography, it was possible to register the waveforms of pulsed radiation and associate the moments of its appearance with the phases of the discharge. The radiation has the form of a single ultra-wideband electromagnetic pulse (EMP) with a duration of about 0.5 ns and a rise time of about 200 ps. Using an original measurement scheme, a spatial localization of the microwave radiation source was carried out.

Keywords: ultra-wideband electromagnetic pulse, high-voltage discharge, air breakdown, streamer propagation, laboratory modeling

Электромагнитное излучение длинных искровых разрядов, в том числе — молниевых, известно достаточно давно. В частности, мониторинг протяженных атмосферных разрядов свидетельствует о мощном радиоизлучении на частотах от десятков до сотен МГц [Brook, Kitagawa, 1964; Harvey, Lewis, 1973; Kachurin et al., 1974]. Натурные измерения импульсного радиоизлучения молний на частотах выше 1 ГГц сопряжены с множеством трудностей.

В последнее время развиваются теоретические и численные модели, предсказывающие генерацию СВЧ излучения высоковольтных разрядов в форме сверхширокополосных электромагнитных импульсов (СШП ЭМИ) нано- и субнаносекундной длительностей, как следствие быстрых лавинно-стримерных процессов на малых пространственных масштабах [Kosarev et al., 1970; Cooray 2012; Luque, 2017]. Существуют экспериментальные работы, посвященные исследованию волновых форм излучения, возникающего при пробое воздушных промежутков различной длины при атмосферном давлении [Shi et al., 2019; Vernon et al., 2009; Mareev et al., 2023]. В частности, СВЧ излучение в форме отдельных всплесков субнаносекундной длительности было измерено на разряде в облаке заряженных капель [Gushchin et al., 2021] и на специальной установке для генерации импульсного излучения лавинно-стримерного разряда [Zudin et al., 2022]. Большой интерес представляет работа [Parkevich, 2023].

Перечисленные экспериментальные работы, в том числе последних лет, не являются исчерпывающими в вопросах характеристики излучения. Эти обстоятельства привели нас к проведению настоящего исследование импульсного СВЧ излучения длинного искрового разряда на генераторе импульсных напряжений (ГИН), собранном по схеме Маркса [Mareev et al., 2023]. Длительность импульса ГИН изменяется от реализации к реализации в пределах 12–18 мкс, а амплитуда напряжения составляла примерно 800 кВ.

Регистрации СВЧ излучения осуществлялась измерительным полосковым преобразователем ИППЛ-Л [Sakharov et al., 2012], датчиком магнитного поля ТПМП и квазирупорной ТЕМ-антенной [Fedorov, 2021]. Используемые датчики позволяют правильно воспроизводить волновую форму импульсов нано- и субнаносекундной длительности.

В большинстве разрядов на установке ГИН 1 МВ был обнаружен импульс длительностью не более 1 нс и фронтом не более 0,5 нс. Такие импульсы различной амплитуды встречаются примерно в 70 % реализация искрового разряда. В некоторых реализациях импульс излучения регистрировался несколько раз. Такие импульсы обладают спектральными компонентами на частотах до нескольких ГГц. На рис. 1a–b приводятся осциллограммы сигнала с ИППЛ-Л после фильтрации при помощи цифрового ФВЧ. На рис. 1 c приведена осциллограмма исходного сигнала. На рис. 1d приведены осциллограммы с трех диагностик на наносекундной развертке. Сигнал магнитного датчика ТПМП приведен с коэффициентом 120 π, для удобства изображения осциллограммы в одних осях с сигналами электрических датчиков. Длительность фронта импульса составляет примерно 0,25 нс, а длительность самого импульса около 0,5 нс.

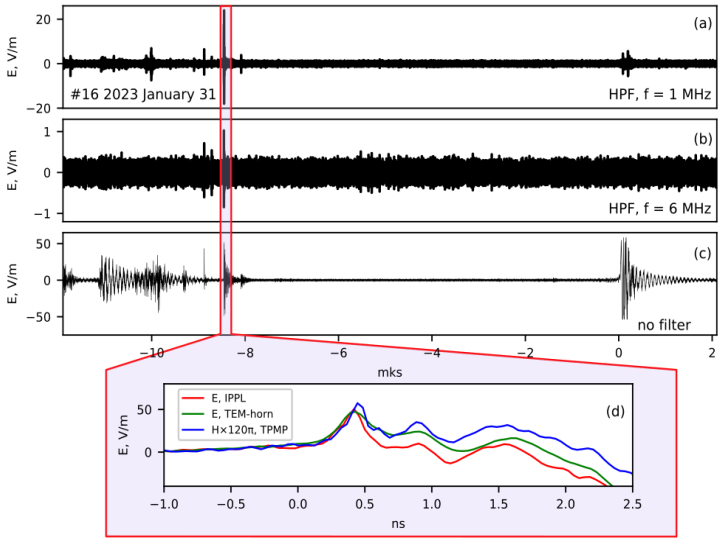

Рис. 1. Волновые формы сверхвысокочастотного излучения длинной искры. Сигнал с ИППЛ-Л после фильтрации при помощи цифрового ФВЧ с частотой среза a) 1 ГГц и b) 6 ГГц; c) исходный сигнал, зарегистрированный ИППЛ-Л, на микросекундной временной развертке; c) волновые форма наносекундного импульса: зарегистрированная при помощи ИППЛ-Л (соответствует рис. 3a–c), а также датчиками ТЕМ-антенна и ИППЛ-Л

Набор фотографий, полученных в ходе экспериментов, был отсортирован относительно момента времени регистрации СШП импульса. На каждой фотографии приведена шкала времени, где за момент времени «0» (широкая белая метка) принято время, в которое регистрировался искомый импульс. Тонкая красная метка соответствует моменту времени, в который сделана фотография (значение времени фотосъемки указанно в наносекундах над шкалой времени). Введение такой системы времени позволило достаточно точно иллюстрировать стадии разряда. Фотография 2 e сделана за 180 нс до момента регистрации СВЧ. На этой фотографии хорошо видно, что на заземленном электроде присутствует свечение, обусловленное стартов контрстримера. Фотография на рис. 2f сделана через 24 нс после момента регистрации СВЧ. Можно сделать вывод, что вспышка на нижнем электроде предшествует появлению СВЧ импульса.

Эксперимент на установке ГИН 1 МВ включал измерения, направленные на локализацию источника обнаруженного СВЧ излучения. Измерения проводились с использованием двух измерительных диагностик: ТЕМ-антенны и ТПМП. ТЕМ-антенна использовался как независимая антенна, которая оставалась неподвижной в ходе эксперимента. Длины кабелей двух диагностик выбраны одинаковыми. Датчик магнитного поля ТПМП в ходе эксперимента перемещался по вертикали.

Расстояние от уровня пола до предполагаемого источника наносекундного импульса обозначим h. Датчик магнитного поля ТПМП размещался на штативе на высоте H над уровнем пола. Расстояния между разрядным промежутком и подставкой с ТПМП в горизонтальной плоскости составляло l_0. Можно рассмотреть два момента времени t_0 и t_1, которые соответствуют временам прихода сигнала наносекундного импульса на ТЕМ-антенна и ТПМП соответственно; $\delta t = t - t_0$. Таким образом, задача минимизации принимает следующий вид:

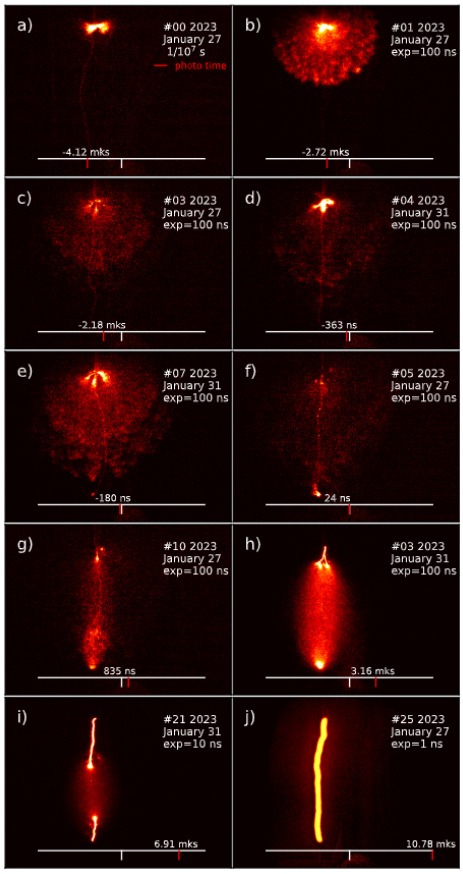

Рис. 2. Феноменология развития разряда на установке ГИН — 1 МВ. (a) Первые вспышки и рост нескольких лидеров на верхнем электроде; (b–e) рост стримерной короны с верхнего (потенциального) электрода в сторону нижнего (заземленного) электрода; (f) фотография первых вспышек на нижнем электроде; (e) фотография, сделанная через 24,6 нс после прохождения СВЧ импульса; (g–i) развитие восходящего лидера навстречу восходящему; (j) обратный удар

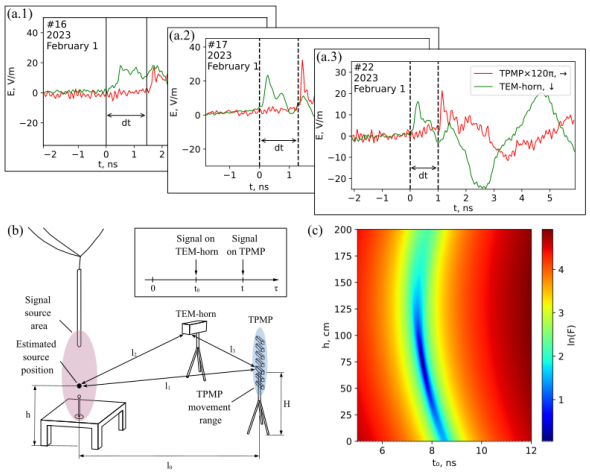

Рис. 3. Обнаружение источника СВЧ излучения, возбуждаемого длинной искрой в пространстве. a.1)–a.3) Способ вычисления задержки между сигналами, зарегистрированными разными диагностиками; b) схема пространственного размещения измерительной аппаратуры; c) графическое представление решения задачи минимизации в плоскости параметров (t_0, h)

Решение задачи минимизации выражения в плоскости параметров (t_0, h) по переменным $t_{0_s} \in t_0, h_s \in h$ показано на рис. 3. На рис. 3a.1–3 a.3 приводится общая методика определения задержки регистрации сигнала при помощи двух диагностик. На рис. 3 b приведена схема расположения оборудования в ходе эксперимента. На рис. 3 c приводится численное решение задачи минимизации. Минимальное значение невязки соответствует параметру $h \approx 70$ см. Высота нижнего электрода над полом составляет 85 см. Таким образом, источник СВЧ излучения локализован в непосредственной близости от нижнего электрода.

Работа была поддержана в рамках 10 проекта Национального центра физики и математики (НЦФМ) «Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика» и Госзадания № 0030-2021-0028 «Лабораторное и численное моделирование нестационарных плазменных процессов в атмосфере и космосе».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Brook M., Kitagawa N. Radiation from lightning discharges in the frequency range 400 to 1000 mc/s // J. Geophys. Res. 1964. V. 69(12). P. 2431–2434.

Harvey R.B., Lewis E.A. Radio mapping of 250- and 925-megahertz noise sources in clouds // J. Geophys. Res. 1973. V. 78(12). P. 1944–1947.

Kachurin L.G., Karmov M.I., Medaliyev H.H. Osnovnyye kharakteristiki radioizlucheniya konvektivnykh oblakov // Izvetiya Akademii nauk SSSR. Fizika Atmosphery I Okeana. 1974. V. 10(11). P. 1164. (in Russian).

Kosarev E.L., Zatsepin V.G., Mitrofanov A.V. Ultrahigh frequency radiation from lightnings // J. Geophys. Res. 1970. V. 75(36). P. 7524–7530.

Cooray V., Cooray G. Electromagnetic radiation field of an electron avalanche // Atmospheric Res. 2012. V. 117. P. 18–27.

Luque A. Radio frequency electromagnetic radiation from streamer collisions // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 2017. V. 122(19). P. 10497–10509.

Shi F., Liu N., Dwyer J. R., Ihaddadene K.M.A. VHF and UHF electromagnetic radiation produced by streamers in lightning // Geophys. Res. Lett. 2019. V. 46(1). P. 443–451. https://doi.org/10.1029/2018gl080309.

Cooray V., Arevalo L., Rahman M. et al. On the possible origin of X-rays in long laboratory sparks // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys. 2009. V. 71, iss. 17–18. P. 1890–1898.

Parkevich E.V. Natural sources of intense ultra-high-frequency radiation in high-voltage atmospheric discharges // Phys. Rev. E. 2023. V. 108, N 2.

Mareev E.A., Shlyugaev Y.V., Shatalina M.V. et al. X-Ray and Gamma Radiation of Lightning Discharge: Orbital Observations and Laboratory Simulation in Experiments with Long Sparks // Astron. Rep. 2023. V. 67. P. 104–114.

Gushchin M.E., Korobkov S.V., Zudin I.Y. et al. Nanosecond electromagnetic pulses generated by electric discharges: Observation with clouds of charged water droplets and implications for lightning // Geophys. Res. Lett. 2021. V. 48. e2020GL092108.

Zudin I., Gushchin M., Vershinin I. et al. Amplitude–Temporal and Spectral Characteristics of Pulsed UHF-SHF Radiation of a High-Voltage Streamer Discharge in Air under the Atmospheric Pressure // Energies. 2022. V. 15. P. 9425.

Sakharov K.J., Mikheev O.V., Turkin V.A. et al. Device for measuring parameters of electromagnetic pulse with ultra-short rise time // Russian Federation patent. 2012. RU2468375C1.

Fedorov V.M. Antenna Array with TEM-Horn for Radiation of High-Power Ultra Short Electromagnetic Pulses // Electronics. 2021. V. 10. P. 1011.