

04.1

## Высокоэффективный метод калибровки системы локализации точечных источников СВЧ-излучения

© И.С. Байдин, А.В. Огинов, Е.В. Паркевич, А.И. Хирьянова, К.В. Шпаков

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия  
E-mail: i.baydin@lebedev.ru

Поступило в Редакцию 9 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 17 мая 2024 г.

Принято к публикации 28 мая 2024 г.

Описана методика локализации с сантиметровой точностью источника радиоизлучения гигагерцевого диапазона, генерируемого известным точечным источником, с применением четырех сверхширокополосных антенн. Локализация выполняется по вычислению пространственного расположения первой вспышки СВЧ-генератора.

**Ключевые слова:** радиоизлучение, триангуляция, атмосферный искровой разряд.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.18.58627.19947

В работе [1] нами была представлена сверхширокополосная антенна, рассчитанная и смоделированная для применения в экспериментах по исследованию радиоизлучения, генерирующегося в начальной фазе искрового разряда. В [1] нами показано, что наиболее высокочастотная часть радиоспектра искрового разряда приходится на предпробойную стадию его развития. Времена генерации радиоизлучения на частотах 1–6 GHz измеряются единицами наносекунд, и радиоизлучение регистрируется в виде нескольких всплесков. В ряде работ [2–4] разные авторы фиксируют импульсы СВЧ с частотами 1.5–1.6 и 2.4 GHz. В [5–8] обсуждаются процессы, приводящие к генерации СВЧ, и демонстрируется возможность локализации источников СВЧ-излучения, генерируемого в начальной фазе сильноточного атмосферного искрового разряда.

В настоящей работе демонстрируются методы, применяемые при настройке и проверке системы СВЧ-локализации, представленной в работе [5]. В ходе калибровочных экспериментов мы протестировали систему радиорегистрации, локализовав СВЧ-излучение, создаваемое компактным микроволновым генератором, выдающим импульсы напряжения амплитудой порядка 10 kV и током менее 1 mA (рис. 1). Высоковольтная часть самодельного микроволнового генератора представляет собой диодный каскадный генератор высокого напряжения 1, залитый компаундом, и благодаря этому имеет вытянутую цилиндрическую форму. Генератор питался от 6 V литиевой батареи 2 и разряжался в искровой промежуток 4 длиной 10 mm нажатием кнопки 3. С целью уменьшения возможной неопределенности при нахождении положения областей излучения искровой промежуток был размещен вблизи области с геометрическим центром 5 СВЧ-генератора (его результирующие размеры составляют  $7 \times 3.5 \times 4$  cm). Все контакты генератора, соединенные проводами 6, были изолированы, а сам генератор помещен на диэлектрический стол 7 в

центре исследуемого разрядного промежутка вдали от металлических электродов [9–11]. Сделано это было с целью подавить излучение диполя, которое может быть вызвано генератором на любой близлежащей металлической поверхности и может исказить одиночные всплески СВЧ-излучения, используемые для решения проблемы локализации. Диэлектрический стол 7 в свою очередь был присоединен к системе ступеней перемещения микрометрической точности. Генерация СВЧ-излучения длится около 400 ns на частотах до 6 GHz, причем наибольшая мощность излучения достигается в полосе частот 1–2.5 GHz.

Используемые антенны Вивальди, имеющие линейную поляризацию, были установлены на диэлектрических стойках на разных расстояниях в „дальней зоне“ от центра разрядного промежутка и регистрировали СВЧ-излучение с определенными задержками (рис. 2, b). Антенны были отрегулированы таким образом, чтобы их основные лепестки диаграммы направленности были направлены к центру разрядного промежутка, а поляризация каждой антенны приблизительно совпадала с направлением оси разрядного промежутка. Положения антенн в пространстве были измерены с точностью 0.5 cm. При синхронизации сигналов были учтены все задержки внутри каждой из антенн, а также задержки каждого из сигнальных трактов.

Полученный с антенн сигнал регистрируется осциллографом LeCroy WM 8620A с полосой пропускания 6 GHz и минимальным временем дискретизации 50 ps. Осциллограф помещен в экран-комнату и подключен к антеннам кабелями с низким уровнем потерь марки SF-141 FER (затухание не превышает 1.1 dB/m на частотах ниже 6 GHz) длиной 9 m. Сигналы СВЧ-излучения были записаны без аттенуаторов из-за их малой амплитуды. Важным качеством сигналов было то, что рассматриваемое время их нарастания между первой точкой и первым пиком самого первого пакета составляло около

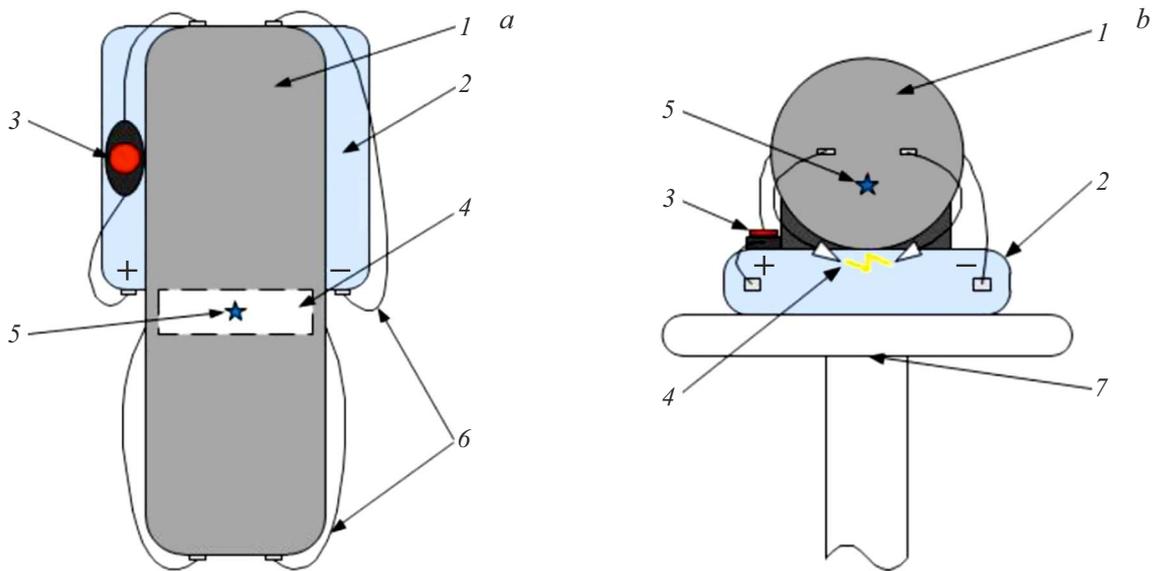


Рис. 1. Схематическое изображение микроволнового генератора. *a* — вид сверху, *b* — вид сбоку. Пояснение в тексте.

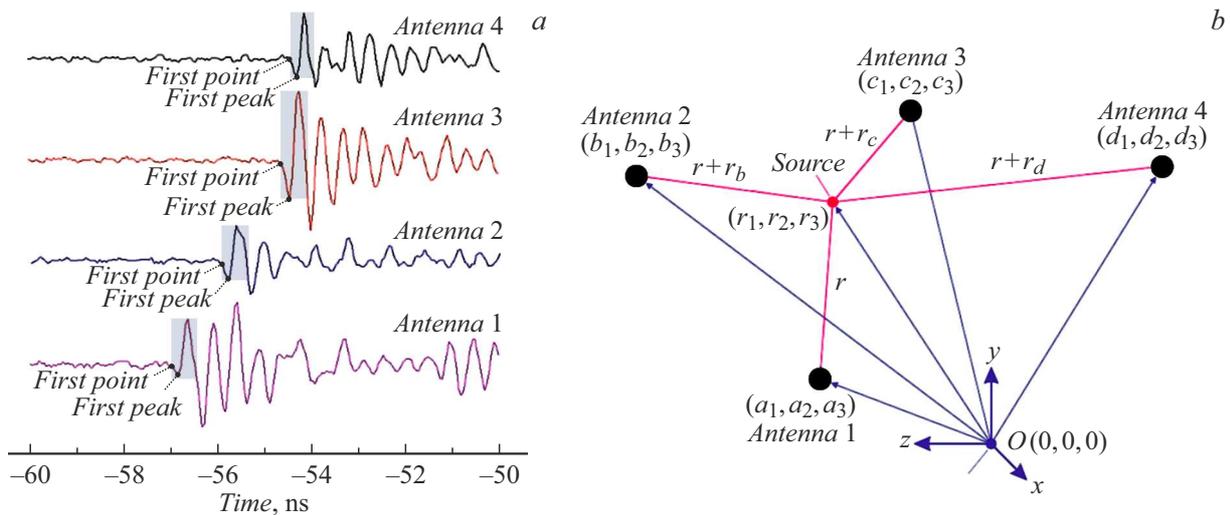


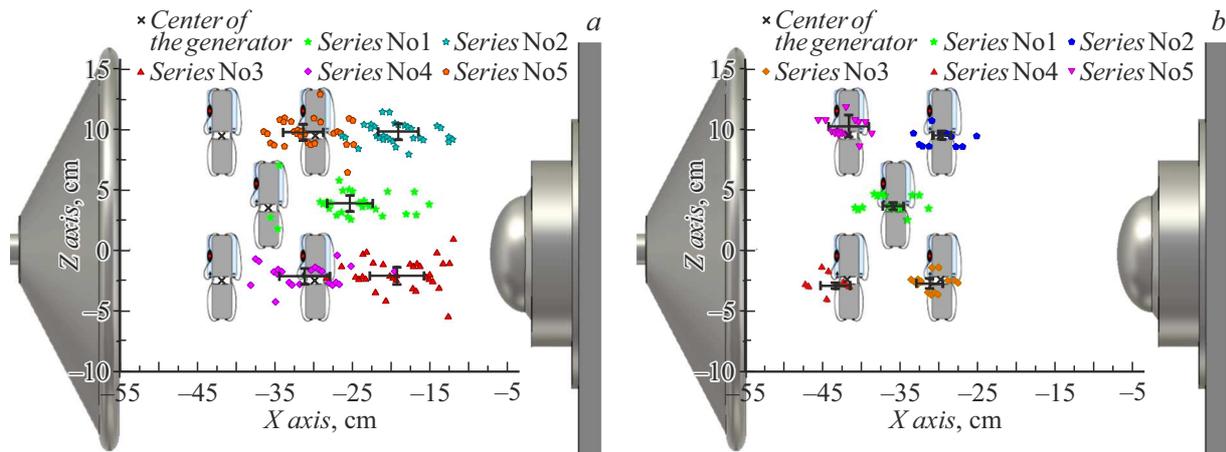
Рис. 2. Типичный сигнал СВЧ-излучения (*a*) и схема комплекса локализации (*b*).

100 ps, при этом увеличение амплитуды сигнала более чем на порядок превышало уровень шума. Различие амплитуд первого полупериода сигналов с антенн связано не только с расположением антенн на различном расстоянии от источника, но и, по всей видимости, с диаграммой направленности источника. При взаимной перестановке двух антенн (например, антенн 3 и 4) сохраняется эффект превышения амплитуды на антенне в положении 3 примерно в 1.5 раза относительно других антенн.

Чтобы идентифицировать и локализовать одиночный всплеск в сигналах СВЧ-излучения, мы разработали специальный метод, основанный на анализе спектральных и временных характеристик сигналов, записанных параллельно. Согласно этому методу, первоначально

для самой первой вспышки на кривой каждого полезного сигнала должна быть найдена первая точка выше уровня шума. Ее абсолютная амплитуда принимается равной максимальной амплитуде колебаний сигнала до момента начала СВЧ-излучения (см. начало сигнала на рис. 2, *a*). Начиная с первой точки ищутся основные закономерности колебаний сигнала за период времени около 1 ns. Такие закономерности (например, полярность фронта и длительность импульса) должны коррелировать друг с другом для всех четырех сигналов, полученных с антенн.

Для определения точного положения источника СВЧ-радиоизлучения решается обратная задача локализации (рис. 2, *b*). Предполагается, что источник — точечный диполь (точка с координатами  $r_1, r_2$  и  $r_3$ ), расстояние от источника до первой антенны  $r$  — неизвестная



**Рис. 3.** Источники СВЧ-излучения, локализованные в пяти сериях по 50 событий. *a* — по точке выхода из шума, без корректировки систематической ошибки; *b* — по точке максимума вспышки с корректировкой систематической ошибки.

величина. Антенна 1 стоит ближе всего к источнику; следовательно, сигнал на ней всегда будет наблюдаться раньше, чем на остальных антеннах. Тогда, зная точное положение всех четырех антенн в заданной системе координат и относительные временные задержки между сигналами на каждой из антенн, можно сказать, что задача локализации (нахождение величины  $r$ ) сводится к решению системы линейных уравнений. Решение представляет собой точку, в которой должен находиться точечный источник.

В калибровочных экспериментах были рассмотрены пять серий по 50 событий (рис. 3). Плоскость  $XZ$  — это горизонтальная плоскость разрядного промежутка, исследуемого в работе [5]. Ось  $X$  представляет собой ось разрядного промежутка длиной 55 см. В каждой серии калибровочных экспериментов СВЧ-генератор имел одинаковое положение вдоль вертикальной оси  $Y$ , причем его удлиненная часть была направлена вдоль оси  $Z$ . Геометрический центр генератора перемещался в горизонтальной плоскости  $XZ$  в разные стороны на расстояние 6 см относительно центрального положения. Этих положений достаточно для проверки достоверности локализации источника в областях разрядного промежутка, где с наибольшей вероятностью локализуются плазменные СВЧ-источники. Каждая точка в плоскости  $XZ$  связана с самым первым всплеском, идентифицированным в сигналах СВЧ-излучения. Для каждой серии были определены положения статистических центров локализованных источников вместе с их стандартными отклонениями вдоль основных осей координат. При апробации метода локализации мы протестировали два способа выбора точек внутри исследуемой вспышки. В первом случае мы брали точку, следующую за выходом из шума (рис. 3, *a*). Во втором случае бралась точка первого максимума/минимума для четырех коррелирующих вспышек. Отдано предпочтение второму способу, так как статистически он помогает

локализовать источник точнее и точки располагаются кучнее.

Из рис. 3 видно, что даже при предварительной калибровке всех трактов сигнала (с погрешностью 100 ps) и положений антенн (с погрешностью 0.5 см) точность локализации при определении областей излучения оказывается довольно хорошей (в масштабах всей установки). Все локализованные источники находятся в пределах высоты генератора (отклонение не превышает 4 см). Здесь среднее стандартное отклонение положений источников относительно их статистических центров во всех пяти сериях не превышает 2 см.

Наибольший разброс положений источников наблюдается вдоль оси  $X$ . Примечательно, что во всех сериях статистические центры локализованных источников не совпадают с геометрическим центром микроволнового генератора. Каждый статистический центр удален от геометрического центра примерно на 13 см, что указывает на определенную постоянную ошибку при решении задачи локализации. Такая ошибка может быть вызвана разбросом задержек на трактах передачи сигнала, который не может быть измерен с точностью, превышающей ту, которая допускалась в ходе калибровочных экспериментов.

Суть задачи учета систематической ошибки заключается в следующем. Зная координаты  $(x, y, z)$  геометрического центра источника СВЧ-излучения (который, как показали расчеты, совпадает с геометрическим центром генератора на рис. 1 и 3), координаты антенны  $(x_i, y_i, z_i)$  и относительные временные задержки  $\Delta t_{ij}$  (где  $i, j = 1-4$ ) между сигналами, записанные в 50 событиях, можно найти статистические поправки  $\sigma_{ij}$  к задержкам  $\Delta t_{ij}$ . Поправки  $\sigma_{ij}$  включают все неизвестные разбросы в трактах сигнала и координатах антенны. Математически эта задача выполняется при минимизации каждого из шести выражений при помощи функции RMS, стремящейся к нулю. Таким образом,

мы выяснили, что для всех пяти серий эксперимента наилучшее соответствие между положениями статистических центров источников СВЧ-излучения и центром микроволнового генератора получено при  $\sigma_{12} = -40$  ps,  $\sigma_{13} = -55$  ps и  $\sigma_{14} \approx 0$  ps. Результаты с учетом этих поправок представлены на рис. 3, *b*. Предположение, что наиболее вероятная область излучения совпадает с геометрическим центром микроволнового генератора, оказалось оптимальным для всех серий.

Таким образом, в работе представлены методы калибровки диагностического оборудования, предназначенного для локализации СВЧ-выпущек сантиметрового диапазона, при помощи компактного микроволнового генератора. Показан способ корректировки и исправления статистической ошибки, возникающей при локализации координат источника. Можно сделать вывод, что приведенный метод подходит для калибровки диагностической системы радиорегистрации и полученные результаты согласуются с теоретическими предположениями и результатами для других диагностик. Описанные методы будут применяться для комплексного исследования генерации СВЧ-излучения высоковольтного атмосферного искрового разряда, что в будущем позволит лучше понять фундаментальные процессы, протекающие на начальной стадии разряда.

### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 23-19-00524).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] И.С. Байдин, А.В. Огинов, Е.В. Паркевич, *ЖТФ*, **91** (12), 1910 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.12.51756.12-21 [I.S. Baidin, A.V. Oginov, E.V. Parkevich, *Tech. Phys.*, **67** (15), 2366 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.15.55261.12-21].
- [2] D. Petersen, W. Beasley, *Atmos. Res.*, **135**, 314 (2014). DOI: 10.1016/j.atmosres.2013.02.006
- [3] J. Montanyá, F. Fabró, V. March, O. van der Velde, G. Solá, D. Romero, O. Argemí, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, **136**, 94 (2015). DOI: 10.1016/j.jastp.2015.06.009
- [4] P. Kochkin, J. Montanya, V. March, in *Generation of runaway electron beams and X-rays in high pressure gases techniques and measurements*, ed by V.F. Tarasenko (Nova Science, 2016), vol. 1, p. 157.
- [5] E.V. Parkevich, A.I. Khirianova, T.F. Khirianov, I.S. Baidin, K.V. Shpakov, A.A. Rodionov, Ya.K. Bolotov, V.A. Ryabov, Yu.K. Kurilenkov, I.S. Samoylov, S.A. Ambrozevich, A.V. Oginov, *Phys. Rev. E*, **106** (4), 045210 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevE.106.045210
- [6] D. Petersen, M. Bailey, W.H. Beasley, J. Hallett, *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, **113** (D17), D17205 (2008). DOI: 10.1029/2007JD009036
- [7] I.M. Kutsyk, L.P. Babich, *Plasma Phys. Rep.*, **47** (3), 251 (2021). DOI: 10.1134/S1063780X21030089
- [8] V. Cooray, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, **136**, 39 (2015). DOI: 10.1016/j.jastp.2015.09.008
- [9] С.А. Чайковский, А.В. Огинов, К.В. Шпаков, В.А. Богаченков, Е.Н. Волков, Ю.А. Суковатицин, *Изв. вузов. Физика*, **58** (9/2), 258 (2015).
- [10] A.V. Agafonov, A.V. Oginov, A.A. Rodionov, V.A. Ryabov, K.V. Shpakov, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **28** (9), 095014 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab3c79
- [11] A.V. Agafonov, V.A. Bogachenkov, A.P. Chubenko, A.V. Oginov, A.A. Rodionov, A.S. Rusetskiy, V.A. Ryabov, A.L. Shepetov, K.V. Shpakov, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **50** (16), 165202 (2017). DOI: 10.1088/1361-6463/aa5dba