

АНТЕННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ МОЩНЫХ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

В. И. Кошелев

*Институт сильноточной электроники СО РАН
koshelev@lhfe.hcei.tsc.ru*

В работе приведен краткий анализ исследований, направленных на разработку антенных систем различного типа, предназначенных для излучения мощных импульсов сверхширокополосного излучения. Основное внимание уделяется решеткам на основе комбинированных антенн.

Введение

Основные области применения мощных импульсов сверхширокополосного (СШП) излучения – это радиолокация удаленных объектов и исследования электромагнитной совместимости и устойчивости радиоэлектронных систем больших объектов в условиях воздействия сильных электромагнитных полей. Каждое конкретное применение накладывает свои требования к параметрам СШП импульсов и технической реализации мощных источников излучения. Простые оценки [1] показывают, что для обнаружения объектов с эффективной площадью рассеяния $\sim 1 \text{ м}^2$ на расстоянии $R \sim 100 \text{ км}$ необходимо иметь мощные источники импульсов СШП излучения длительностью $\sim 1 \text{ нс}$ при частоте повторения $\sim 1 \text{ кГц}$ и эффективным потенциалом $E_p R \sim 10 \text{ МВ}$, где E_p – пиковая напряженность поля в дальней зоне. Уменьшение длительности импульса приводит к улучшению пространственного разрешения по дальности и, как следствие, к увеличению вероятности правильного распознавания объектов [2]. Однако использование СШП импульсов пикосекундной длительности для радиолокации объектов, удаленных на большие расстояния, не представляется возможным вследствие дисперсии атмосферы, приводящей к расплыванию импульса при его распространении уже на расстояниях $< 5 \text{ км}$ [3].

Выбор длительности импульса в исследованиях по электромагнитной совместимости и устойчивости также является предметом обсуждения. Исследования показали [4], что пикосекундные импульсы не оказывают существенного влияния на функционирование различных систем, вследствие конечного времени реакции исследуемых систем на воздействие импульса. В этой связи для этих исследований нужны СШП импульсы наносекундной длительности (5-10 нс). Увеличение длительности импульсов излучения возможно за счет увеличения длительности импульса напряжения на входе СШП излучающей системы, либо использование генераторов с затухающими колебаниями. В первом случае спектр излучения сдвигается в сторону низких частот, а во втором – ширина спектра уменьшается. Одновременное увеличение длительности импульса и полосы частот возможно за счет синтеза излучения в дальней зоне при возбуждении многоэлементной антенной системы, состоящей из подрешеток, оптимизированных для излучения биполярных импульсов разной длительности [5]. Это требует применения управляемых с высокой стабильностью генераторов биполярных импульсов напряжения.

Важным является создание СШП систем с широкими возможностями по управлению характеристиками излучения. Сюда относятся спектр и поляризация излучения, сканирование волновым пучком, частотный режим и другие.

1. Основные принципы построения мощных источников СШП излучения

В процессе развития данного научного направления наработаны различные варианты построения мощных источников СШП излучения. Рассмотрим только основные, позволившие получить импульсы излучения с эффективным потенциалом мегавольтного уровня. Можно

выделить три основных направления в создании мощных источников СШП излучения. Для первого направления характерно использование схемы один высоковольтный генератор – одна антенна. В таких источниках для повышения направленности излучения используют антенны с большой апертурой. Для второго направления характерно применение антенных решеток, в которых каждая антенна возбуждается от отдельного управляемого генератора, то есть число генераторов равно числу антенн в решетке. И, наконец, третье направление характеризуется применением многоэлементных антенных систем, возбуждаемых от одного генератора через делитель мощности. Каждое из этих направлений имеет свои достоинства и недостатки. Следует отметить, что в таких источниках для возбуждения антенн и решеток используют высоковольтные импульсы разной формы: монополярные, биполярные и с двойной экспонентой (быстрое экспоненциальное нарастание и медленное экспоненциальное спадание выходного напряжения генератора). Достоинством биполярного импульса является высокая эффективность излучения, обусловленная его спектром, и меньшая примерно в два раза амплитуда импульса напряжения по сравнению с монополярным при близких значениях пиковой напряженности поля излученных импульсов. Этот фактор является определяющим при достижении предельных параметров СШП источников, так они могут ограничиваться электрическим пробоем излучающих систем. В стороне от указанных выше направлений, которые будут далее рассматриваться, находятся СШП источники на основе параболического рефлектора с возбуждением излучателя мощным пикосекундным лазерным импульсом [6].

2. Одиночные антенны

Как уже отмечалось выше, в СШП источниках с одиночной антенной, в основном, используются широкоапертурные излучатели для уменьшения ширины диаграммы направленности и, соответственно, увеличения эффективного потенциала излучения $E_p R$. К таким излучателям, в первую очередь, относится антенна на основе параболического рефлектора, так называемая IRA антенна [7, 8]. На основе IRA различной модификации создан целый класс мощных источников СШП излучения. Антенна возбуждается коническим ТЕМ фидером, на вход которого подается длинный импульс напряжения (тока) с коротким передним фронтом. Излученный импульс пропорционален производной по времени от входного импульса тока. В этой связи длительность импульса излучения близка к длительности переднего фронта напряжения (~ 100 пс). Таким образом, эффективно излучается только малая часть энергии импульса, соответствующая переднему фронту импульса. Большая часть энергии возбуждающего импульса рассеивается в разряднике, ограничивая его ресурс стабильной работы. Используя IRA с большой (3-4 м) апертурой и входным напряжением 0.1-1 МВ, получены пикосекундные импульсы излучения с эффективным потенциалом 1.28 МВ [9] и 5.4 МВ [10] с частотой повторения сотни герц в пачечном режиме. Здесь следует также отметить разработку СШП источников на основе одиночной рупорно-параболической антенны [11]. Ее отличие от IRA заключается в конструкции облучателя параболического рефлектора.

Второй по широте применения является ТЕМ антенна. Существует много вариантов конструктивного исполнения таких антенн и СШП источников на их основе [11-15]. Как правило, ТЕМ антенна выполнена из двух треугольных пластин различного профиля и обеспечивающих плавный переход от волнового сопротивления генератора до волнового сопротивления свободного пространства. ТЕМ антенна является антенной бегущей волны, поэтому ее длина большая и примерно соответствует длине волны нижней границы спектра излучаемого импульса. В экспериментах [15] при возбуждении ТЕМ антенны, имеющей площадь апертуры 0.17 м^2 , биполярным импульсом напряжения получено СШП излучение с эффективным потенциалом 0.64 МВ при частоте повторения до 300 Гц в пачечном режиме.

Целый ряд мощных СШП источников с одиночным излучателем создан на основе комбинированной антенны с расширенной полосой пропускания [16-18], возбуждаемой высоковольтным биполярным импульсом напряжения длительностью 2 нс [19], 1 нс [20, 21], 0.5 нс [22] и 0.2 нс [23] при частоте повторения 100 Гц. В основе комбинированной антенны лежат две идеи. Для расширения полосы пропускания антенны в сторону низких частот используется комбинация излучателей электрического и магнитного типов [24], а для

расширения полосы пропускания в сторону высоких частот в качестве излучателя электрического типа используется короткий ТЕМ рупор. Антенна является компактной, характерные размеры составляют половину пространственной протяженности возбуждающего биполярного импульса. При длительности биполярного импульса 1 нс ее размеры составляют 15 см. Малые размеры позволяют помещать ее в диэлектрические контейнеры, заполненные элегазом (SF_6) с небольшим избыточным давлением, для обеспечения электрической прочности антенны при подаче высоковольтного (100-200 кВ) импульса напряжения. Эффективность антенны по энергии и пиковой мощности при возбуждении ее биполярным импульсом достигает 90 % и более. Диаграмма направленности по пиковой мощности имеет форму кардиоиды с шириной на половинном уровне $\sim 100^\circ$. Выполненные исследования позволили получить импульсы СШП излучения с эффективным потенциалом 0.1-0.4 МВ, который возрастал с увеличением длительности возбуждающего антенны биполярного импульса от 0.2 нс до 2 нс. Следует сразу отметить, что комбинированная антенна разрабатывалась с учетом возможности применения ее в СШП широкоугольных сканирующих решетках. В этой связи были выполнены теоретические исследования [25], в которых были оценены предельные значения эффективного потенциала произвольной СШП антенны и показано, что по этому параметру одиночные антенны располагаются в следующей последовательности: IRA, ТЕМ, а затем комбинированная антенна. Однако при одинаковой площади IRA и решетки комбинированных антенн с числом элементов ~ 100 последняя имеет эффективный потенциал в 1.5 раз больше при условии отсутствия энергетических потерь в фидерной системе решетки.

3. Активные многоэлементные решетки

Создание мощных источников с электронным управлением связывается с применением активных элементов на основе полупроводниковых структур различного типа. К таким ключам предъявляются жесткие требования по разбросу времени включения, которые возрастают при уменьшении длительности переднего фронта напряжения. При использовании импульсов напряжения большой длительности представляют также интерес исследования, направленные на управление генераторами с газовыми разрядниками [26, 27]. Ниже будут рассматриваться только основные результаты, полученные в СШП источниках, в которых число генераторов равно числу элементов в решетке.

Наиболее впечатляющие результаты получены при разработке мощного источника СШП излучения GEM 2 [28, 13]. Антенная решетка размером 1.6×1.6 м выполнена на основе отрезков прямоугольного волновода со вставками для расширения полосы пропускания. 144 управляемых лазерным излучением полупроводниковых ключа с выходным напряжением 17 кВ обеспечивали подачу биполярного импульса напряжения длительностью 1 нс на элементы решетки с частотой повторения 3 кГц. Волновой пучок мог сканироваться в двух плоскостях в пределах $\pm 30^\circ$. В экспериментах получены импульсы СШП излучения с эффективным потенциалом 1.65 МВ. Установка была создана для лабораторных исследований и не нашла практического применения ввиду ее сложности из-за большого числа управляемых элементов.

Упрощение СШП источников данного класса возможно за счет уменьшения количества управляемых генераторов при одновременном увеличении выходного напряжения с целью сохранения величины эффективного потенциала. Такие исследования были выполнены в работах [29, 30]. Напряжение генераторов было увеличено до 45 кВ. Форма импульса напряжения соответствовала двойной экспоненциальной при длительности переднего фронта ~ 100 пс. При использовании решетки 2×4 ТЕМ антенн с полной апертурой 56×56 см получены импульсы с эффективным потенциалом 0.45 МВ при частоте повторения 250 Гц и до 2 кГц в пачечном режиме. В двухэлементной решетке продемонстрирована возможность сканирования волновым пучком в горизонтальной плоскости в пределах $\pm 15^\circ$.

4. Антенные решетки, возбуждаемые от одного генератора

Достоинством данного подхода является отсутствие проблемы синхронизации многих генераторов. Однако при этом нет и электронного управления волновым пучком, присущего

активным решеткам. Этот недостаток может быть преодолен, если перед входом каждой антенны устанавливать СШП управляемые линии задержки. В этом случае сканирование волновым пучком может быть реализовано не за счет задержки включения генераторов, а за счет управления временем задержки импульсов напряжения на входе антенн решетки. Отметим, что в решетках, возбуждаемых от одного генератора, могут использоваться антенны разного типа, например, ТЕМ [14] и комбинированные. Ниже будет приведен анализ решеток на основе комбинированных антенн в силу их компактности, возможности достижения предельных значений эффективного потенциала и реализации широкоугольного режима сканирования волновым пучком.

Разработаны два варианта антенно-фидерных систем. В первом варианте [19, 21, 22, 31] на выходе генератора биполярных импульсов длительностью 2-0.2 нс с волновым сопротивлением 50 Ом устанавливается волновой трансформатор с выходным импедансом $50/16 = 3.125$ Ом и затем 16-канальный делитель мощности, от которого кабелями импульсы напряжения подводятся к элементам антенной решетки 4×4 . Пиковая напряженность поля возрастает пропорционально корню квадратному от числа элементов в решетке без учета потерь в фидерной системе. Потери энергии в фидерной системе возрастают с уменьшением длительности импульсов и могут достигать 40-50 % от энергии на входе. Оптимальными по эффективности излучения являются решетки, в которых антенны соединены гальванически в Е-плоскости и разнесены в Н-плоскости [19]. Ширина диаграмм направленности уменьшается пропорционально числу элементов в каждом направлении и составляет примерно 20° . Фидерная система позволяет разделять решетку на две подрешетки с перпендикулярными поляризациями и возбуждать их импульсами, задержанными относительно друг друга за счет разной длины фидеров для каждой подрешетки [21]. В исследованиях при синхронном возбуждении антенн в решетках получены импульсы СШП излучения с эффективным потенциалом 0.37-1.7 МВ.

В описанной выше системе есть два недостатка: малое число антенн в решетке, ограниченное поперечными размерами трансформатора, и ограниченное время жизни вследствие пробоев кабелей при увеличении амплитуды, длительности, частоты повторения импульсов. Для преодоления этих недостатков разработана фидерная система, в которой трансформатор и делитель мощности совмещены в одно устройство. Такая система применена для решетки 8×8 с апертурой 1.4×1.4 м, возбуждаемой биполярным импульсом длительностью 1 нс [32]. Потери в фидерной системе с масляной изоляцией составили примерно 50 %. В экспериментах получены импульсы СШП излучения с эффективным потенциалом 2.8 МВ на частоте повторения 100 Гц. Ширина диаграммы направленности равна 10° .

Выполнены исследования сканирования волновых пучков в линейных решетках комбинированных антенн при использовании монополярных и биполярных импульсов напряжения [33]. Решетки возбуждались от одного генератора через делитель мощности. Сканирование волновым пучком осуществлялось за счет изменения длин кабелей. Показана возможность широкоугольного сканирования до $40-45^\circ$ в двух плоскостях. Энергетическая эффективность выше при использовании биполярных импульсов напряжения.

Заключение

За прошедшие двадцать лет разработаны физические основы и реализованы различные типы антенн и многоэлементных решеток для излучения СШП импульсов с мегавольтным эффективным потенциалом и высокой направленностью. Однако задачи получения эффективного потенциала ~ 10 МВ и реализация управления излучением на высоком уровне мощности не решены. Для создания СШП радаров на расстоянии 1-10 км перспективны сканирующие решетки комбинированных антенн, возбуждаемых биполярными импульсами напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Koshelev V. I. Proc. IEEE Inter. Conf. on Ultra-Wide Band, Singapore. 2007.

2. Кошелев В. И., Шипилов С. Э., Якубов В. П. РЭ. 2000. Т. 45. № 12. С. 1470-1476.
3. Стадник А. М., Ермаков Г. В. РЭ. 1995. Т. 40. № 7. С. 1009-1016.
4. Book of Abstracts. EUROEM 2008, European Electromagnetics, Lausanne. 2008.
5. Andreev Yu. A., Buyanov Yu. I., Koshelev V. I., et al. Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 4. 1999. P. 181-186.
6. Бессараб А. В., Гаранин Г. С., Мартыненко С. П. и др. ДАН. 2006. Т. 411. № 5. С. 609-612.
7. Baum C. E. Sensor and Simulation Note 321. 1989.
8. Baum C. E., Farr E. G. Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics. 1993. P. 139-147.
9. Giri D. V., Lackner H., Smith I. D., et al. IEEE Trans. Plasma Sci. 1997. V. 25. No. 2. P. 318-326.
10. Baum C. E., Baker W. L., Prather W. D., et al. Proc. IEEE. 2004. V. 92. No. 7. P. 1096-1109.
11. Балдыгин В. А., Бабенко С. А., Бусыгина Л. А. и др. Сборник докладов 2 Всероссийской научной конференции-семинара «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике», Муром. 2006. С. 126-129.
12. Clark R. S., Rinehart L. F., Buttram M. T., Aurand J. F. Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics. 1993. P. 93-98.
13. Agee F. J., Baum C. E., Prather W. D. et al. IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. V. 26. No. 3. P. 860-872.
14. Шпак В. Г., Яландин М. И., Шунайлов С. А., Ульмаскулов М. Р. Известия вузов. Физика. 1996. № 12. С. 119-127.
15. Pokryvailo A., Yankelevich Y., Shapira M. IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32. No. 5. P. 1909-1918.
16. Koshelev V. I., Buyanov Yu. I., Andreev Yu. A., et al. Proc. IEEE Inter. Pulsed Power Plasma Science Conf., Las Vegas. 2001. V. 2. P. 1661-1664.
17. Андреев Ю. А., Буянов Ю. И., Кошелев В. И. РЭ. 2005. Т. 50. № 5. С. 585-594.
18. Андреев Ю. А., Буянов Ю. И., Кошелев В. И. Журнал радиоэлектроники. 2006. № 4: <http://jre.cplire.ru/mac/apr06/1/text.html>
19. Губанов В. П., Ефремов А. М., Кошелев В. И. и др. ПТЭ. 2005. № 3. С. 46-54.
20. Andreev Yu. A., Gubanov V. P., Efremov A. M., et al. Laser and Particle Beams. 2003. V. 21. No. 2. P. 211-217.
21. Ефремов А. М., Кошелев В. И., Ковальчук Б. М. и др. РЭ. 2007. Т. 52. № 7. С. 813-821.
22. Efremov A. M., Koshelev V. I., Kovalchuk B. M., et al. Proc. 14 Inter. Symp. on High Current Electronics, Tomsk. 2006. P. 446-449.
23. Andreev Yu. A., Efremov A. M., Koshelev V. I., et al. Proc. 15 Inter. Symp. on High Current Electronics, Tomsk. 2008. P. 447-450.
24. Беличенко В. П., Буянов Ю. И., Кошелев В. И., Плиско В. В. РЭ. 1999. Т. 44. № 2. С. 178-184.
25. Belichenko V. P., Koshelev V. I., Plisko V. V., et al. Proc. 14 Inter. Symp. on High Current Electronics, Tomsk. 2006. P. 391-394.
26. Яландин М. И., Шпак В. Г. ПТЭ. 2001. № 3. С. 5-31.
27. Месяц Г. А., Шарыпов К. А., Шпак В. Г. и др. Письма в ЖТФ. 2008. Т. 38. № 19. С. 6-13.
28. Oicles J. A., Grant J. R., Herman M. H. Proc. SPIE. 1995. V. 2557. P. 225-236.
29. Efanov V. M., Fedorov V. M., Grekhov I. V., et al. Proc. 13 Inter. Symp. on High Current Electronics, Tomsk. 2004. P. 262-266.
30. Fedorov V. M., Grekhov I. V., Lebedev E. F., et al. Proc. 14 Inter. Symp. on High Current Electronics, Tomsk. 2006. P. 405-408.
31. Андреев Ю. А., Ефремов А. М., Кошелев В. И. и др. Сборник докладов 3 Всероссийской конференции по радиолокации и радиосвязи, Москва. 2009.
32. Koshelev V. I., Efremov A. M., Kovalchuk B. M., et al. Proc. 15 Inter. Symp. on High Current Electronics, Tomsk. 2008. P. 383-386.
33. Koshelev V. I., Plisko V. V. Proc. 14 Inter. Symp. on High Current Electronics, Tomsk. 2006. P. 413-416.