

Излучение мощных линейно поляризованных сверхширокополосных импульсов субнаносекундной длительности гибридной антенной

Е.В. Балзовский, Ю.И. Буянов, А.М. Ефремов, В.И. Кошелев, Э.С. Некрасов, С.С. Смирнов*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**nekrasov@lhfe.hcei.tsc.ru*

Аннотация. Разработан мощный источник сверхширокополосного излучения с гибридной антенной. Гибридная антенна представляет собой офсетный рефлектор, в фокусе которого расположена антенная решетка-облучатель. Элементами антенной решетки являются комбинированные антенны, рассчитанные на возбуждение биполярными импульсами длительностью 0.5 нс. Реализованы режимы работы гибридной антенны при синхронном возбуждении элементов антенной решетки биполярными импульсами напряжения, а также при возбуждении элементов решетки с временной задержкой 1 нс между импульсами – режим сканирования волновым пучком.

Ключевые слова: сверхширокополосные импульсы, антенная решетка, гибридная антенна.

1. Введение

Мощные источники сверхширокополосного (СШП) излучения разрабатываются для исследований взаимодействия сильных электромагнитных полей с различными объектами и радиолокации с высоким пространственным разрешением. Для излучения СШП импульсов с большой пиковой напряженностью поля можно использовать как антенные решетки, так и источники на основе зеркальных антенн [1–3]. Большой интерес представляет разработка источника с управляемыми характеристиками излучения (направление излучения, поляризация). Использование антенной решетки в фокусе офсетной отражательной антенны, так называемой гибридной антенны, позволяет решить данную задачу. В настоящей работе предложена конструкция, включающая решетку 2×2 комбинированных антенн КА, расположенную вблизи фокуса офсетного отражателя. Результаты численного моделирования характеристик гибридной антенны представлены в работе [4]. В качестве элементов антенной решетки облучателя использованы комбинированные антенны КА, рассчитанные на возбуждение биполярными импульсами длительностью 0.5 нс [5].

2. Экспериментальная установка

2.1. Генератор биполярных импульсов

Четырехканальный генератор биполярных импульсов напряжения состоит из генератора высоковольтных монополярных импульсов СИНУС-160, промежуточной ступени обострения и четырехканального формирователя биполярных импульсов F1–F4. Для измерения временной формы и амплитуды генерируемых импульсов (регистрации выходных биполярных импульсов) используются коаксиальные линии со встроенными делителями напряжения.

Посредством изменения давления азота в пределах 40–50 атм в четырех независимых объемах формирователей возможно изменять время срабатывания индивидуальных разрядников, тем самым управлять амплитудой и задержками импульсов в каждом из четырех каналов. На Рис.1 приведены характерные осциллограммы выходных импульсов в канале F1 при давлении 50 атм и в канале F2 при давлениях от 40 до 50 атм. Импульсы имеют амплитуды до 65 кВ и длительность 0.5 нс при частоте следования 100 Гц. Аналогичные импульсы получены в каналах F3 и F4.

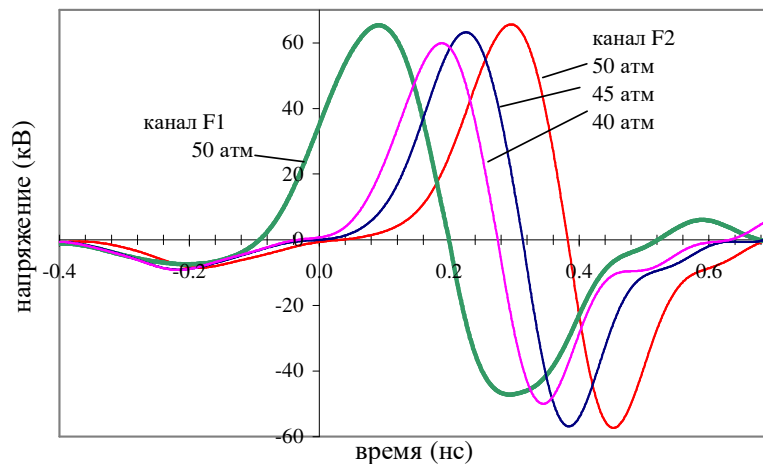


Рис.1. Выходные биполярные импульсы канала F1 при давлении 50 атм и канала F2 при давлениях 40–50 атм.

2.2. Антенная решетка

Антенная решетка-облучатель показана на Рис.2. В качестве элементов решетки использованы комбинированные антенны КА с поперечными размерами 65×60 мм². Четыре антенны ориентированы одинаково и имеют линейную поляризацию. Центры антенн расположены на окружности с диаметром 125 мм. Для обеспечения электрической прочности на решетку-облучатель установлен диэлектрический контейнер, заполняемый элегазом (SF₆). Полоса согласования антенн в составе решетки по уровню -7.5 дБ (примерно соответствует уровню КСВН = 2.5) занимает диапазон частот от 0.94 до 6.45 ГГц, в то время как спектр биполярного импульса длительностью 0.5 нс занимает диапазон от 1 до 4 ГГц.

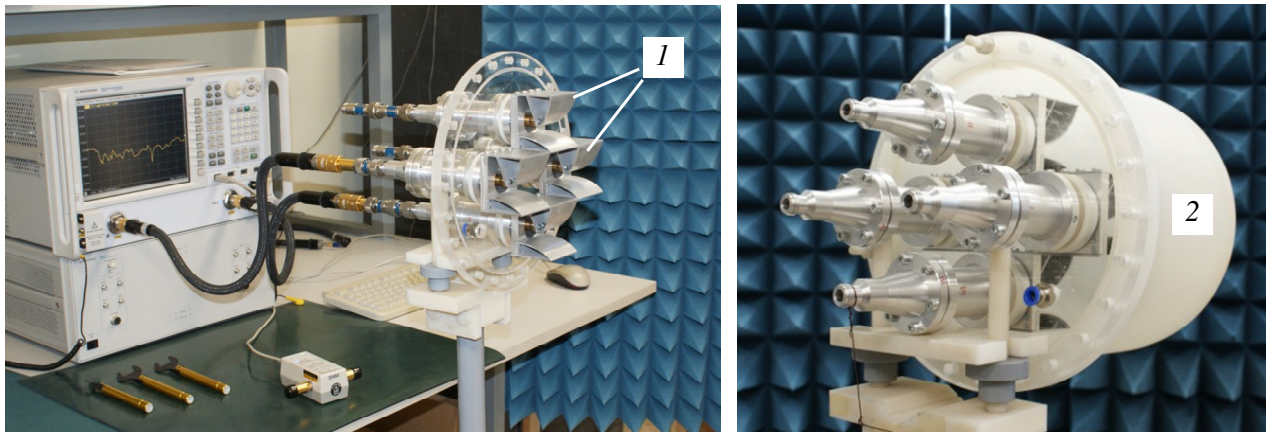


Рис.2. Антенная решетка-облучатель на измерительном стенде: 1 – КА, 2 – диэлектрический контейнер.

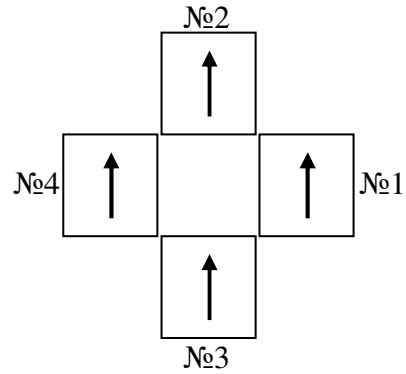
3. Экспериментальные исследования

3.1. Низковольтные измерения

Гибридная антенна и схема расположения элементов в решётке показаны на Рис.3. Офсетный отражатель представляет собой вырезку из параболоида вращения диаметром 1400 мм. Облучатель располагали таким образом, чтобы центр излучения облучателя был совмещен с фокусом рефлектора. Фокусное расстояние используемого рефлектора составляло 700 мм. Регистрация излученного гибридной антенной импульсного поля производилась ТЕМ-антенной с размерами апертуры 400×80 мм.



(а)



(б)

Рис.3. Гибридная антенна (а) и схема решетки (б).

Измерено распределение поля гибридной антенны в H - и E -плоскостях при синхронном возбуждении элементов. На Рис.4 показано распределение поля в H -плоскости для основной (кривая 1) и кроссполяризации (кривая 2). По уровню 0.707 относительно амплитуды ширина пучка составляет 8.3 градуса. Максимальное значение амплитуды поля достигается в осевом направлении. Максимальное значение поля кроссполяризованной компоненты составляет 0.21 от амплитуды основной компоненты при отклонении максимума 4 градуса. Все измерения приведены для пиковой напряженности электрического поля E_p .

Распределение поля в E -плоскости для основной (кривая 1) и кроссполяризации (кривая 2) показано на Рис.5. На расстоянии 4.17 м ширина волнового пучка составляет 9 градусов. Величина кроссполяризации не превышает 0.04 от амплитуды поля основной поляризации.

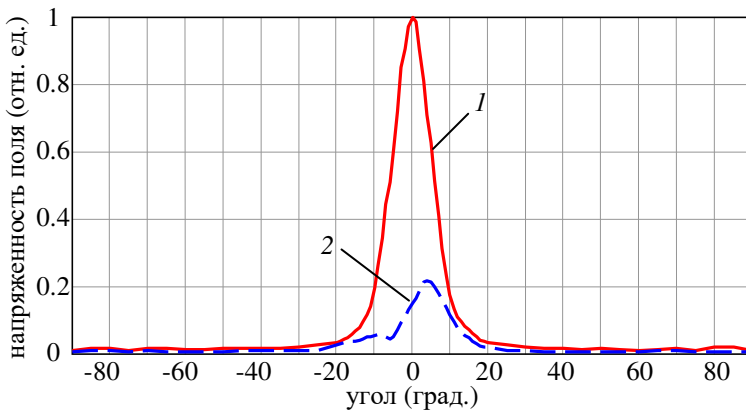


Рис.4. Распределение поля гибридной антенны в H -плоскости для основной (кривая 1) и кроссполяризации (кривая 2) при синхронном возбуждении.

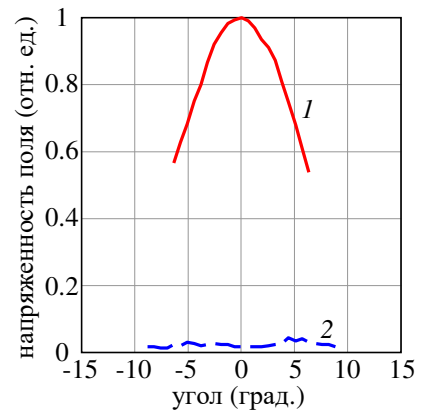


Рис.5. Распределение поля гибридной антенны в E -плоскости для основной (кривая 1) и кроссполяризации (кривая 2) при синхронном возбуждении.

Сканирование в H -плоскости осуществляется при возбуждении с задержкой элементов решетки-облучателя №1 и №4 (Рис.3б). Угловое распределение поля при сканировании в H -плоскости показано на Рис.6. Наблюдается симметрия распределений относительно нуля, максимум излучения при возбуждении элемента №1 направлен на -4 градуса, при

возбуждении элемента №4 – 4 градуса. Ширина распределения поля по уровню 0.707 относительно амплитуды одинакова для обоих случаев и составляет 7.7 градусов.

Сканирование в E -плоскости осуществляется путем возбуждения с временной задержкой элементов решетки-облучателя №2 и №3 (Рис.3б). Распределение излученного поля показано на Рис.7. Максимум излучения при возбуждении антенны №2 направлен на –3.5 градусов. Ширина распределения по уровню 0.707 составляет 7.1 градуса. При возбуждении с задержкой антенны №3 максимум излучения направлен на 5 градусов. В этом случае ширина распределения импульсного поля составляет 6.6 градусов.

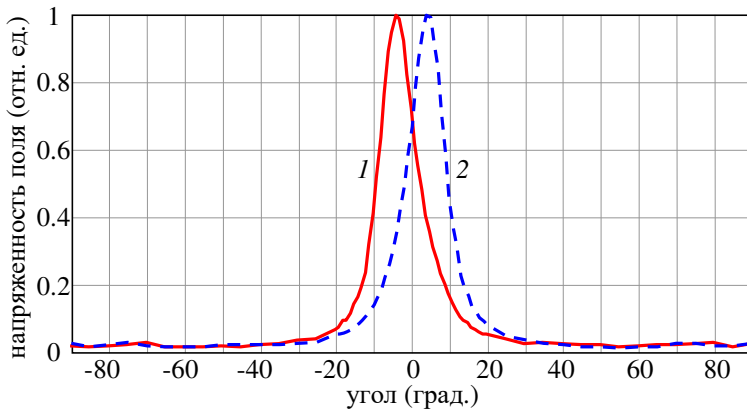


Рис.6. Распределение поля гибридной антенны в H -плоскости при возбуждении с задержкой элементов решетки №1 (кривая 1), №4 (кривая 2).

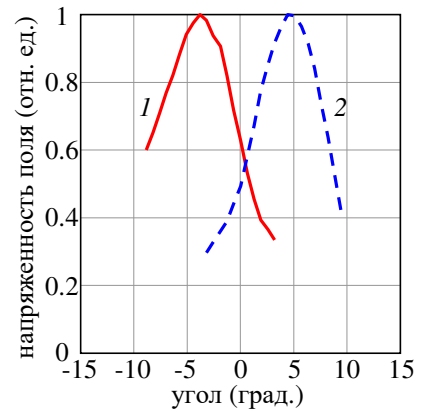


Рис.7. Распределение поля гибридной антенны в E -плоскости при возбуждении с задержкой элементов решетки №2 (кривая 1), №3 (кривая 2).

3.2. Излучение мощных импульсов

Проведены измерения мощных импульсов СШП излучения в режиме синхронного возбуждения элементов решетки при частоте повторения 10 и 100 Гц. Временная форма восстановленных импульсов напряжения на входе кабельного тракта $V(t)$ при указанных частотах повторения приведена на Рис.8. Суммарное значение номиналов всех аттенюаторов равнялось 71 дБ. Временная форма импульса напряженности электрического поля $E(t)$, падающего на ТЕМ-антенну, рассчитывалась как отношение $V(t)/l_0$, где l_0 – действующая длина ТЕМ-антенны, равная 3.84 см на центральной частоте 2 ГГц спектра возбуждающего биполярного импульса.

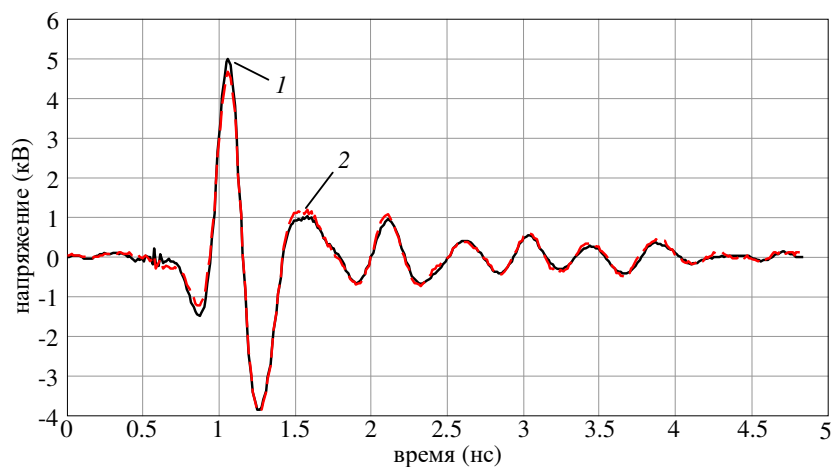


Рис.8. Временная форма восстановленного импульса напряжения на входе кабельного тракта при частоте повторения 10 (кривая 1) и 100 Гц (кривая 2).

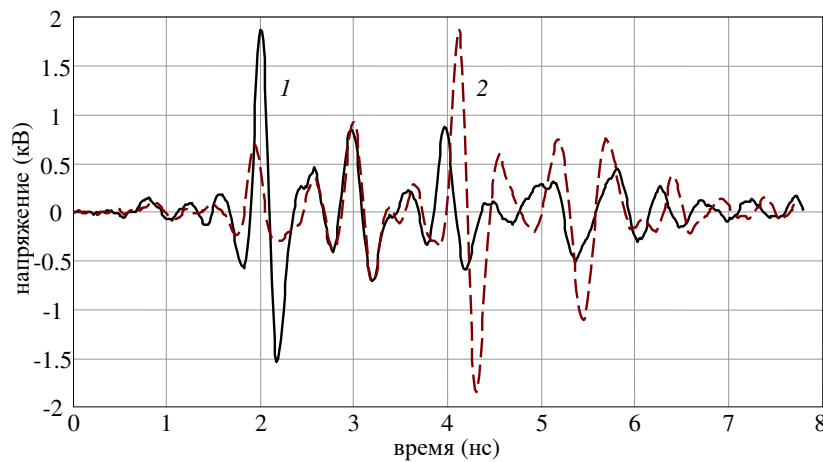


Рис.9. Восстановленная временная форма импульсов на выходе ТЕМ-антенны при повороте гибридной антенны по часовой стрелке (кривая 1) и против часовой стрелки (кривая 2).

Расчет произведения пиковой напряженности электрического поля E_p на расстояние производился согласно выражению $V_p R / l_d$, где V_p – пиковое значение напряжения на выходе ТЕМ-антенны, R – расстояние от фокальной плоскости зеркальной антенны вдоль фокальной оси до раскрыва приемной ТЕМ-антенны. С учетом расстояния между антеннами $R = 4.5$ м произведение $E_p R$ было равно 580 кВ при частоте повторения 10 Гц и 540 кВ при частоте повторения 100 Гц.

Проведены также высоковольтные измерения в режиме сканирования волновым пучком. Элементы решетки возбуждались последовательно импульсами с временной задержкой 1 нс. Измерения в H -плоскости проведены при повороте гибридной антенны на заранее определенные углы, найденные при измерениях на низком уровне мощности. Эти углы соответствуют максимумам излучения антенны, возбуждаемой элементом №1 или элементом №4. На осциллограммах наблюдается один импульс большой амплитуды и три импульса меньшей амплитуды, излучаемые другими антеннами. Для кривых 1 и 2 на Рис.9 произведение пиковой напряженности поля на расстояние было равно 220 кВ.

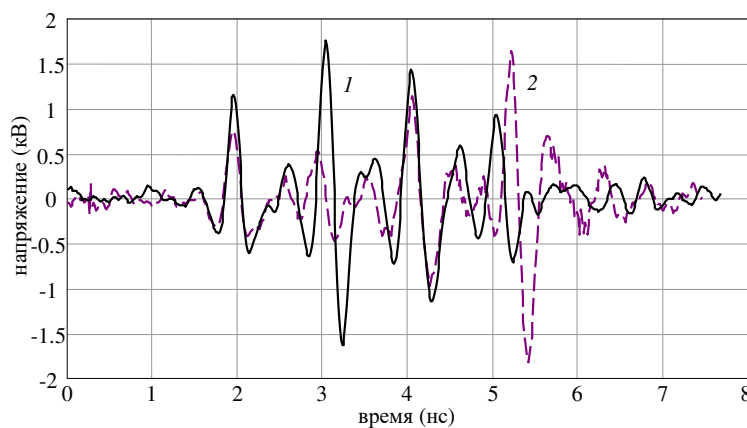


Рис.10. Восстановленная временная форма импульсов на выходе ТЕМ-антенны при подъёме приёмной ТЕМ-антенны вверх (кривая 1) и вниз (кривая 2).

Измерения в E -плоскости проведены при углах 5 градусов вверх от оси и 3.5 градуса вниз от оси, перпендикулярной фокальной плоскости, проходящей на высоте, равной

половине высоты рефлектора. Эти углы соответствуют максимумам излучения антенны, возбуждаемой элементом №2 или элементом №3. Восстановленная временная форма импульсов на выходе приемной антенны приведены на Рис.10. На осциллограммах наблюдается один импульс большой амплитуды и три импульса меньшей амплитуды, излучаемые другими антеннами. Для кривых 1 и 2 на Рис.10 произведение пиковой напряженности поля на расстояние было равно 210 и 200 кВ, соответственно.

4. Заключение

Создан источник СШП излучения с офсетной гибридной антенной. Измерены характеристики излучения в режиме синхронного возбуждения решетки комбинированных антенн импульсами длительностью 0.5 нс. Получены мощные импульсы СШП излучения с произведением пиковой напряженности поля на расстояние (4.5 м) более 500 кВ при частоте повторения импульсов до 100 Гц. Измерены характеристики излучения СШП источника в режиме дискретного сканирования волновым пучком при временной задержке 1 нс между биполярными импульсами напряжения. Получены мощные импульсы СШП излучения с произведением пиковой напряженности поля на расстояние (4.5 м) 200 кВ в режиме дискретного сканирования волновым пучком при частоте повторения импульсов до 100 Гц.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-08-00529).

5. Литература

- [1] Фортов В.Е., Исаенков Ю.И., Михайлов В.М., Нестеров Е.В., Осташев В.Е., Семенов Ю.В., Строганов В.А., *Радиотехника и электроника*, **58**(11), 1102, 2013; doi: 10.7868/S0033849413110041
- [2] Ryu J., Lee J., Chin H., Yeom J.-H., Kim H.-T., Kwon H.-O., Ho Han S., Soo Choi J., *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **41**(8), 2283, 2013; doi: 10.1109/TPS.2013.2272472
- [3] Balzovsky E., Buyanov Y., Gubanov V., Efremov A., Koshelev V., Nekrasov E., Stepchenko A., *Proc. 20th Int. Symp. on High-Current Electronics (ISHCE)*, Tomsk, Russia, 61, 2018; doi: 10.1109/ISHCE.2018.8521226
- [4] Буянов Ю.И., Балзовский Е.В., Кошелев В.И., Некрасов Э.С., *Изв. вузов. Физика*, **62**(7), 111, 2019; doi: 10.17223/00213411/62/7/111
- [5] Balzovsky E., Buyanov Y., Koshelev V., Nekrasov E., *Microw. Opt. Technol. Lett.*, **63**, 2866, 2021; doi: 10.1002/mop.32994