

МОЩНЫЙ ИСТОЧНИК СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСОВ СИНТЕЗИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2019 г. А. М. Ефремов, В. И. Кошелев*, В. В. Плиско, Е. А. Севостьянов

*Институт сильноточной электроники СО РАН
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3*

**e-mail: koshelev@lhfe.hcei.tsc.ru*

Поступила в редакцию 16.03.2018 г.

После доработки 28.03.2018 г.

Принята к публикации 15.04.2018 г.

Создан мощный источник сверхширокополосного излучения на основе синтеза электромагнитных импульсов с разной полосой частот. Разработан четырехканальный формирователь биполярных импульсов длительностью 0.5 и 1 нс с высокой стабильностью. Каждый элемент решетки 2×2 комбинированных антенн возбуждался от своего канала формирователя. Исследовано два режима синтеза излучения: по максимальной напряженности поля и максимальной ширине спектра. Для первого режима получены импульсы излучения с полосой частот 0.39–2.13 ГГц и эффективным потенциалом 600 кВ, для второго — импульсы синтезированного излучения с расширенной полосой частот 0.15 – 2.7 ГГц и эффективным потенциалом 200 кВ. Частота повторения импульсов была 100 Гц.

DOI: 10.1134/S003281621806006X

ВВЕДЕНИЕ

Мощные источники сверхширокополосного (с.ш.п.) излучения разрабатываются для исследований восприимчивости электронного оборудования к воздействию электромагнитных полей, биологических эффектов и радаров с распознаванием объектов [1]. Важной задачей здесь является расширение спектра мощных импульсов излучения. Выделим два направления решения данной задачи.

Первое направление связано с уменьшением длительности импульса излучения. В рамках этого направления созданы мощные источники с.ш.п.-излучения на основе антенн типа IRA [2]. Нами предложено [3] расширять спектр излучения за счет сложения мощных электромагнитных импульсов в свободном пространстве при возбуждении решетки комбинированных антенн биполярными импульсами напряжения разной длительности.

Первый мощный источник синтезированного излучения [4] состоял из решетки 2×2 комбинированных антенн, возбуждаемой от четырехканального формирователя биполярных импульсов длительностью 2 и 3 нс. Для формирования диаграммы направленности с максимумом в главном направлении [5, 6] антенны, возбуждаемые биполярными импульсами одинаковой длительности, располагались по диагонали.

Цель данной работы — разработка и исследование мощного источника синтезированного излучения в более высоком диапазоне частот на основе возбуждения решетки комбинированных антенн биполярными импульсами длительностью 0.5 и 1 нс.

В отличие от источника [4], где использовались разные комбинированные антенны, оптимизированные для биполярных импульсов длительностью 2 и 3 нс, в данном источнике использовались одинаковые антенны с расширенной полосой согласования для излучения биполярных импульсов длительностью 0.5 и 1 нс.

1. КОНСТРУКЦИЯ МОЩНОГО ИСТОЧНИКА СИНТЕЗИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Источник с.ш.п.-импульсов синтезированного излучения (рис. 1) состоит из генератора биполярных импульсов и четырехэлементной антенной решетки. В состав четырехканального генератора биполярных импульсов напряжения входят: генератор высоковольтных монополярных импульсов “Синус-160” (1), промежуточная ступень обострения 2 и четырехканальный формирователь биполярных импульсов 3. Элементами решетки 4 служат комбинированные антенны, которые подключаются к выходам генератора коаксиальными кордельными кабелями РК 50-17-51, заполненными элегазом (SF_6) с давлением 5 атм. Расстояние между центрами элементов решетки в двух плос-

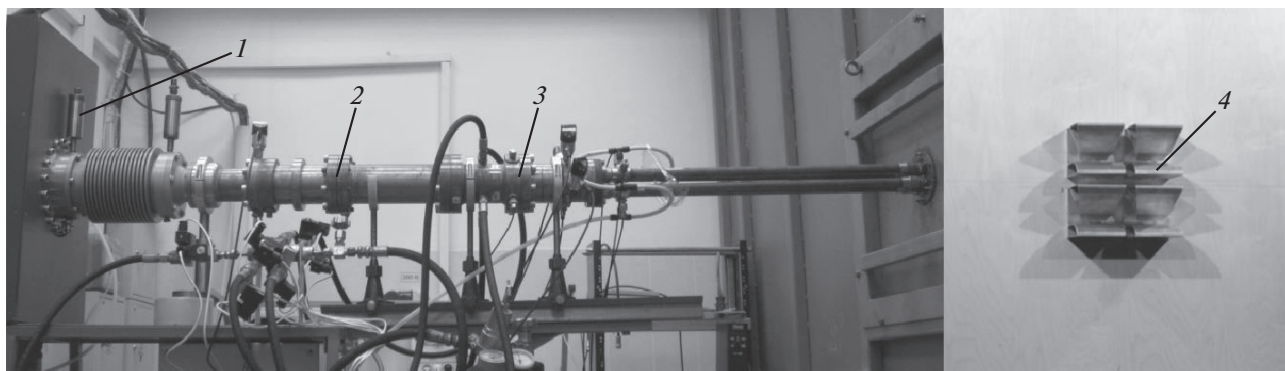


Рис. 1. Мощный источник сверхширокополосного излучения. 1 — генератор монополярных импульсов; 2 — промежуточная ступень обострения; 3 — четырехканальный формирователь биполярных импульсов; 4 — четырехэлементная антенная решетка.

костях было одинаковым и равнялось $d = 16$ см. Решетка находилась в безэховой камере, где и проводились измерения.

2. ЧЕТЫРЕХКАНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР БИПОЛЯРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Для получения высоковольтных биполярных импульсов напряжения мы используем коаксиальные отрезки линий и двухэлектродные газовые разрядники высокого давления, собранные по схеме с разомкнутой линией [7]. В созданном ранее [4] четырехканальном формирователе длительность фронтов биполярных импульсов напряжением длительностью 2 и 3 нс равна 0.4–0.6 нс, что недостаточно для получения биполярных импульсов длительностью 1 и 0.5 нс. Обострить фронты биполярных импульсов можно увеличением скорости нарастания напряжения на электродах разрядников формирователя.

В данной работе для обострения фронтов биполярных импульсов 0.5 и 1 нс мы использовали промежуточную ступень обострения. Она состоит из коаксиальной линии и двухэлектродного разрядника и включена между генератором монополярных импульсов и блоком из четырех формирователей.

На принципиальной схеме генератора биполярных импульсов напряжения (рис. 2) генератор “Синус-160” представлен выходной формирующей линией FL_0 и разрядником S_0 . Эта линия заряжалась от вторичной обмотки трансформатора Тесла до напряжения —360 кВ с частотой следования импульсов 100 Гц и коммутировалась разрядником S_0 через разделительную линию FL_1 и ограничительное сопротивление R_0 на линию FL_2 промежуточной ступени обострения. Линия FL_1 состоит из набора коаксиальных линий с волновы-

ми сопротивлениями от 45 до 88 Ом и суммарной электрической длиной 2.5 нс.

Формирователи F_1 – F_4 собраны по схеме с разомкнутой линией и позволяют формировать биполярные импульсы напряжения с длительностями 1 нс на двух нагрузках по 50 Ом каждая и 0.5 нс на двух других аналогичных нагрузках. При срабатывании разрядника S_1 при напряжении, близком к максимальному, происходит зарядка линий FL_{51} – FL_{54} в режиме бегущих волн через разделительные линии FL_{41} – FL_{44} .

Волновые сопротивления и длительности разделительных линий рассчитывались по методике, предложенной в работе [8], и подобраны таким образом, чтобы иметь более высокое зарядное напряжение линий FL_{51} – FL_{54} с коэффициентом увеличения напряжения 1.3–1.5. При срабатывании разрядников S_{11} – S_{14} , а затем и разрядников S_{21} – S_{24} с относительными задержками, равными двойным пробегам волны по линиям FL_{61} – FL_{64} , в передающих линиях FL_{81} – FL_{84} , нагруженных на согласованные нагрузки R_{11} – R_{14} , формируются биполярные импульсы напряжения. Формирователи F_1 и F_2 позволяют формировать импульсы длительностью 1 нс, а F_3 и F_4 — длительностью 0.5 нс.

Конструкция промежуточной ступени обострения и блока формирователей биполярных импульсов F_1 – F_4 , представленная на рис. 3, состоит из шести газовых объемов. В первом объеме с внутренним диаметром 78 мм в среде азота под давлением 40 атм размещены линии FL_1 – FL_3 , разрядник S_1 и емкостный делитель зарядного напряжения D_1 . В четырех независимых объемах с внутренними диаметрами 25 мм, ограниченных изоляторами 1 и 2, в среде азота под давлениями 30–40 атм расположены все кроме правых частей FL_{81} – FL_{84} , разрядники S_{11} – S_{14} и S_{21} – S_{24} и емкостные делители зарядного напряжения D_{21} – D_{24} .

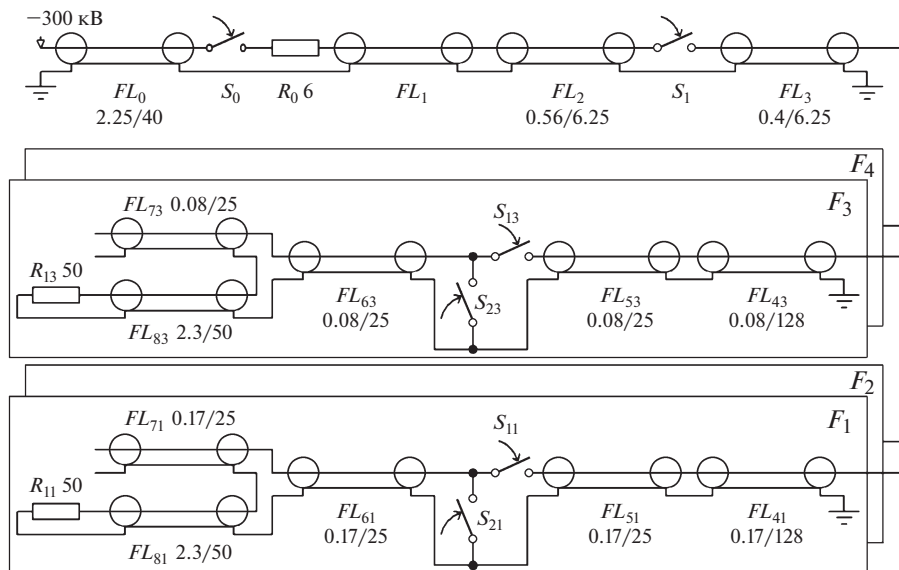


Рис. 2. Принципиальная схема четырехканального генератора биполярных импульсов. F – формирователи, FL – коаксиальные линии (электрическая длина линии [нс]/ее волновое сопротивление [Ом]), S – разрядники, R – сопротивления.

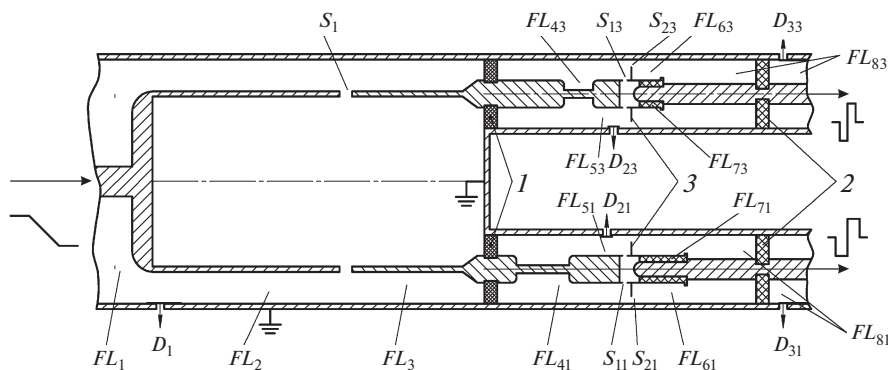


Рис. 3. Конструкция промежуточной ступени обострения и четырехканального формирователя биполярных импульсов. 1, 2 – изоляторы; 3 – диск; D – делители напряжения.

Линии FL_{71} – FL_{74} имеют изоляцию из капролона. Electroдами кольцевого разрядника S_1 являются концы внутренних проводников линий FL_2 и FL_3 . Межеlectродный зазор в разряднике S_1 равен 1.4 мм. Electroды обостряющих разрядников S_{11} – S_{14} встроены в концы линий FL_{51} – FL_{54} и FL_{61} – FL_{64} , межеlectродные расстояния равны 1.2–1.4 мм. Electroдами срезающих разрядников S_{21} – S_{24} служат диски 3 толщиной 2 мм и цилиндрические вставки, установленные на наружных проводниках линий FL_{61} – FL_{64} с зазорами 0.7 мм.

Материал Electroдов разрядников S_1 , S_{11} – S_{14} и S_{21} – S_{24} – медь. Оси четырех формирователей расположены в диаметрально противоположных точках на окружности $\varnothing 53$ мм. Давление азота в

объемах промежуточной линии и в формирователях F_1 – F_4 автоматически поддерживалось с точностью 0.5 атм с помощью системы контроля и регулировки давления, выполненной на базе 5 датчиков давления модели PSD-30 и 10 клапанов напуска и сброса газа. Идентичные по конструкции правые части передающих линий FL_{81} – FL_{84} с встроенными делителями напряжения на связанных линиях D_{31} – D_{34} и нагрузки R_{11} – R_{14} имеют элегазовую изоляцию под давлением 5 атм.

Импульс зарядного напряжения на линию FL_2 поступал от генератора “Синус-160” по линии FL_1 , а выходные биполярные импульсы после срабатывания разрядников S_1 , S_{11} – S_{14} и S_{21} – S_{24} передавались по четырем передающим линиям

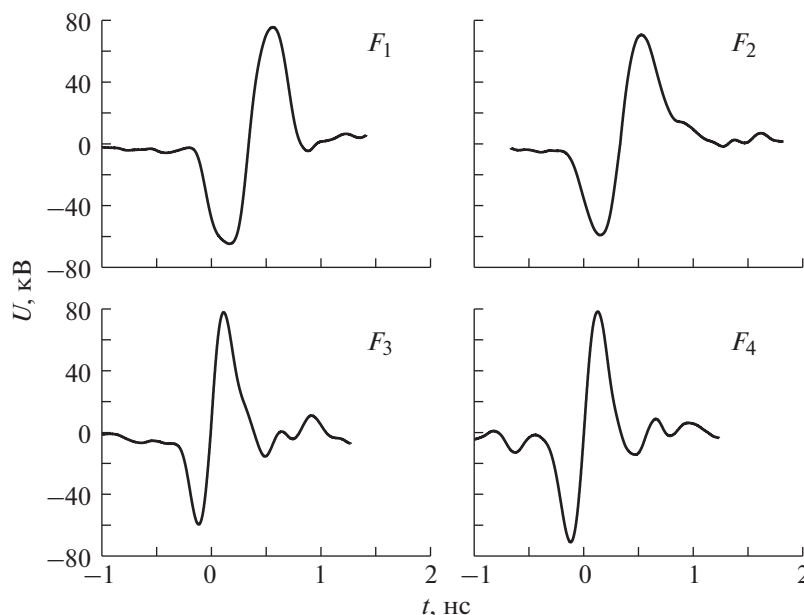


Рис. 4. Биполярные импульсы напряжения, полученные с делителей D_{31} – D_{34} , для формирователей F_1 – F_4 .

FL_{81} – FL_{84} с волновым сопротивлением 50 Ом каждая в согласованные резистивные нагрузки либо в передающие антенны.

Для регистрации выходных биполярных импульсов с делителей напряжения D_{31} – D_{34} и импульсов с делителей зарядных напряжений на линиях FL_2 и FL_{51} – FL_{54} использовался осциллограф TDS 6604 с полосой пропускания до 6 ГГц. Делители D_{31} – D_{34} калибровались при помощи подачи биполярных импульсов напряжения с длительностями 1 и 0.5 нс на входы правых частей линий FL_{81} – FL_{84} от низковольтных генераторов. Эксперимент показал хорошее согласие форм импульсов на выходах линий и восстановленных с коэффициентом ослабления 65 импульсов с делителей напряжения D_{31} – D_{34} . Емкостные делители D_{21} – D_{24} не калиброваны и служат для оценки времени зарядки напряжения на линиях FL_{51} – FL_{54} .

Разрядник S_1 пробивался при напряжении 170 кВ с задержкой 4.3 нс. Регулировкой давлений и зазоров в разрядниках S_{11} – S_{14} и S_{21} – S_{24} добивались симметрии формы биполярных импульсов напряжения с делителей D_{31} – D_{34} и синхронизации моментов перехода через ноль по отдельности для формирователей F_1 , F_2 и F_3 , F_4 . Времена зарядки линий FL_{51} – FL_{54} до моментов коммутации разрядников S_{11} – S_{14} составили 800–950 пс.

Выходные биполярные импульсы, полученные с делителей D_{31} – D_{34} , показаны на рис. 4. Импульсы имеют амплитуду до 80 кВ и длительности 1 и 0.5 нс при частоте следования 100 Гц. Длитель-

ность импульсов определялась путем аппроксимации фронтов и спадов до пересечений с нулевыми линиями. Среднеквадратичный разброс времени моментов перехода биполярных импульсов через ноль между каналами не превышает 50 пс. Среднеквадратичный разброс амплитуды зарядного напряжения генератора “Синус-160” относительно ее среднего значения равно около 1%. При этом среднеквадратичный разброс амплитуд биполярных импульсов относительно их среднего значения для всех формирователей F_1 – F_4 составляет не более 5–6%.

Из энергии, запасенной в формирующей линии FL_0 , 3.6 Дж в промежуточную линию передается 36%, а в нагрузку – 4% (0.14 Дж). Анализ показал, что основные потери энергии связаны с пробоем разрядников при напряжении ниже максимального и потерями в самих разрядниках при коммутации. Выходная пиковая мощность биполярных импульсов достигала 500 МВт.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНТЕЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Предварительно для оценки характеристик синтезированных импульсов были проведены численные расчеты. Для моделирования с.ш.п.-импульса, излученного комбинированной антенной, использовалась производная суммы двух гауссовых функций [5]:

$$E(t, \tau) = \frac{8}{\tau} \left(\frac{4t}{\tau} - 2 \right) e^{-\left(\frac{4t}{\tau} - 2 \right)^2} - \frac{8}{\tau} \left(\frac{4t}{\tau} - 4 \right) e^{-\left(\frac{4t}{\tau} - 4 \right)^2}, \quad (1)$$

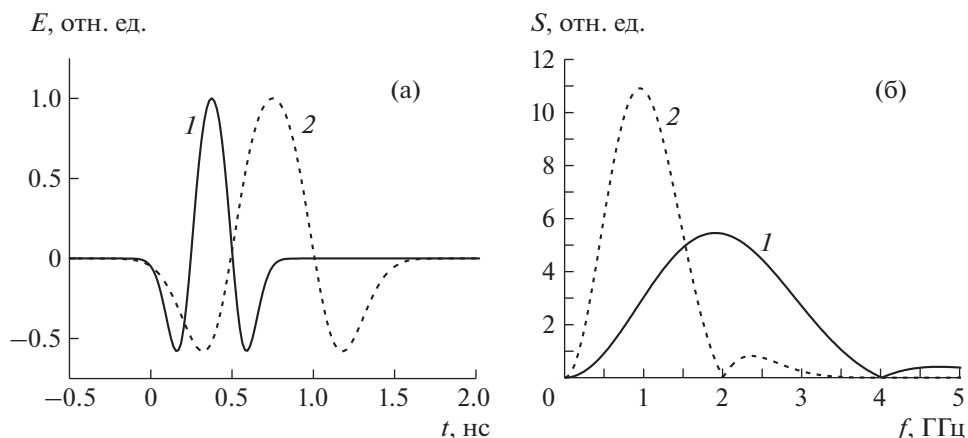


Рис. 5. Импульсы излучения (а), рассчитанные по формуле (1), при возбуждении антенн биполярными импульсами напряжения длительностью 0.5 нс (1) и 1 нс (2), и их соответствующие спектры (б).

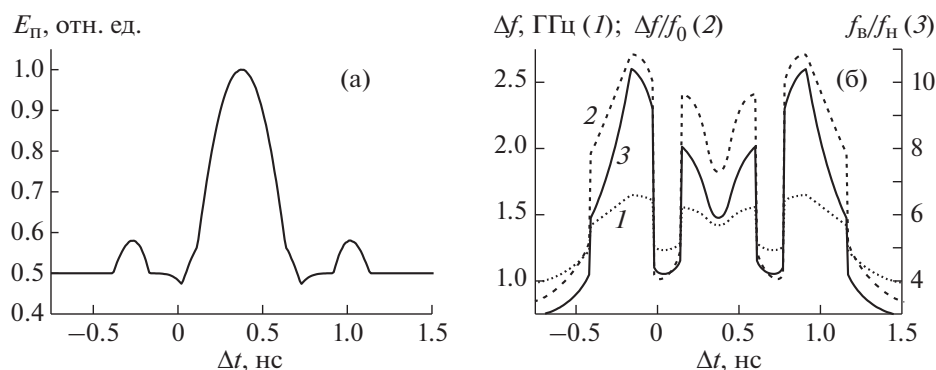


Рис. 6. Зависимости пиковой напряженности поля (а) и спектра суммарного импульса по уровню -10 дБ (б) от задержки между импульсами. 1 — ширина спектра $\Delta f = f_b - f_n$; 2 — относительная ширина спектра $\Delta f/f_0$; 3 — отношение верхней и нижней граничных частот $b = f_b/f_n$.

где τ — длительность биполярного импульса напряжения, возбуждающего антенну, по уровню 0.1 амплитуды. Формула (1) достаточно хорошо моделирует реальные импульсы $E(t)$, излученные комбинированными антеннами, оптимизированными для излучения биполярных импульсов 0.5 нс [9] и 1 нс [10] и их спектры $S(f)$. Импульсы, рассчитанные по формуле (1), приведены на рис. 5а, а их спектры показаны на рис. 5б.

При сложении импульсов излучения результат определяется как характеристиками импульсов, так и их временными задержками относительно друг друга. Таким образом, изменяя задержку между импульсами излучения с разной длительностью (шириной спектра), можем получать импульсы с разными характеристиками: длительностью, амплитудой и шириной спектра.

Будем оптимизировать синтезированный импульс по двум параметрам: максимальной амплитуде поля и максимальной ширине спектра. Заме-

тим, что спектр импульса можно характеризовать следующими параметрами [11]:

1) шириной спектра $\Delta f = f_b - f_n$, где f_n — нижняя, а f_b — верхняя граничные частоты спектра излучения, оцененные по уровню -10 дБ;

2) относительной шириной спектра $\Delta f/f_0$, где $f_0 = (f_b + f_n)/2$ — центральная частота спектра излучения;

3) отношением верхней и нижней граничных частот $b = f_b/f_n$.

Для анализа характеристик синтезированного импульса построим зависимости пиковой напряженности поля E_n и ширины спектра по уровню -10 дБ от задержки между импульсами (рис. 6).

Максимальная пиковая напряженность поля (рис. 6а) достигается при задержке $\Delta t = 0.376$ нс, соответствующей синхронизации положительных максимумов импульсов. При этом амплитуды импульсов суммируются, а отношение верхней и

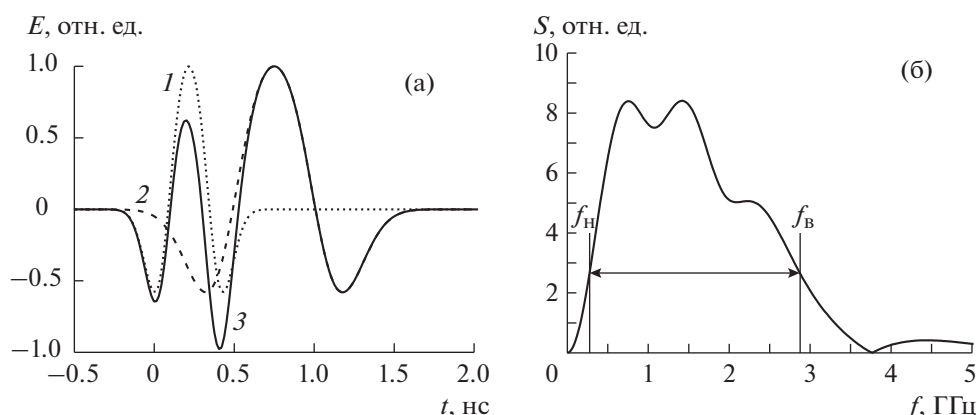


Рис. 7. Сложение импульсов с задержкой -0.16 нс: **а** — импульс излучения при возбуждении антенны биполярным импульсом длительностью 0.5 нс (1), 1 нс (2) и суммарный импульс излучения (3); **б** — спектр суммарного импульса излучения.

нижней граничных частот суммарного импульса по сравнению с импульсами, излученными при возбуждении антенн биполярными импульсами длительностью 0.5 и 1 нс, увеличивается примерно на 27% .

Из рис. 6б видно, что для всех трех параметров, характеризующих спектр импульса, максимальные значения соответствуют задержкам -0.16 и 0.91 нс.

На рис. 7 приведены суммарный импульс для задержки $\Delta t = -0.16$ нс и его спектр. По сравнению с одиночным импульсом отношение верхней и нижней граничных частот суммарного импульса увеличилось в 2.26 раза и составило более трех октав. При этом амплитуда поля суммарного импульса по отношению к амплитуде исходных импульсов излучения не уменьшилась. В табл. 1 приведены частотные характеристики для одиночных импульсов (рис. 5) и суммарных импульсов для задержек 0.376 и -0.16 нс (рис. 7).

Численные расчеты, аналогичные [5], показали также, что для получения симметричной диаграммы направленности для обоих режимов синтеза (максимальная амплитуда и максимальная ширина спектра), что удобно в эксперименталь-

ных исследованиях, антенны в решетке 2×2 , возбуждаемые биполярными импульсами одинаковой длительности, должны располагаться по диагонали.

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕШЕТКИ КОМБИНИРОВАННЫХ АНТЕНН

Элементами решетки служили комбинированные антенны размерами $15 \times 15 \times 17$ см. В отличие от других наших источников с.ш.п.-излучения [1], в этом источнике одна и та же антенна использовалась для излучения биполярных импульсов длительностью 1 нс и 0.5 нс. Для этого разработанная ранее базовая комбинированная антенна [10] для импульсов длительностью 1 нс была модифицирована (полоса согласования расширена в высокочастотную область) для более эффективного излучения импульса длительностью 0.5 нс. Это достигалось уменьшением диаметра коаксиала на входе антенны и изменением геометрии электродов антенны.

Для исследования пространственно-временных характеристик излучения антенн использовались низковольтные биполярные импульсы напряже-

Таблица 1. Параметры расчетных импульсов излучения

Импульс с.ш.п.-излучения	f_n , ГГц	f_b , ГГц	f_0 , ГГц	Δf , ГГц	$\Delta f/f_0$	$b = f_b/f_n$
0.5 нс	0.664	3.074	1.869	2.41	1.289	4.632
1 нс	0.332	1.537	0.934	1.205	1.29	4.632
$0.5 + 1$ нс, макс. амплитуда	0.354	2.092	1.223	1.737	1.42	5.9
$0.5 + 1$ нс, макс. спектр	0.274	2.874	1.574	2.6	1.652	10.48

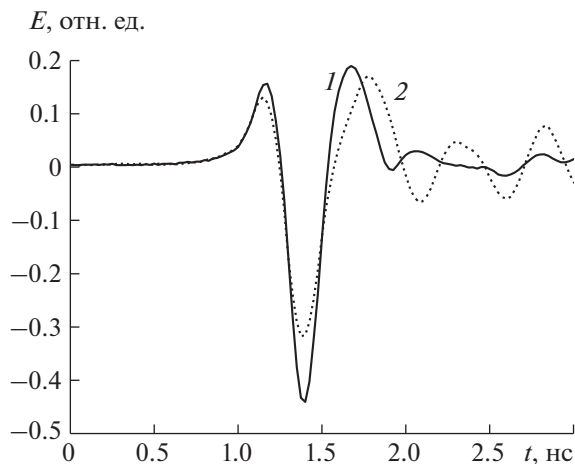


Рис. 8. Осциллограмма импульса, излученного комбинированной антенной при возбуждении биполярным импульсом длительностью 0.5 нс: 1 — модифицированная антенна, 2 — базовая антенна [10].

ния. На рис. 8 для сравнения приведены осциллограммы импульсов, излученных модифицированной и базовой [10] комбинированными антеннами, возбуждаемыми биполярным импульсом длительностью 0.5 нс. Видно, что амплитуда импульса, излученного модифицированной антенной, увеличилась на 40%.

Диаграмма направленности модифицированной антенны (рис. 9) измерялась по пиковой мощности (E_n^2) при возбуждении антенны импульсами 1 и 0.5 нс в E - и H -плоскостях. E -плоскости соответствовал угол места δ , а H -плоскости — азимутальный угол φ . При измерениях комбинированную антенну вращали вокруг ее центра, а неподвижная приемная антенна находилась на расстоянии 4.4 м от нее. По сравнению с базовой антенной ширина диаграммы направленности на полувысоте при

возбуждении биполярным импульсом 1 нс увеличилась на 10° в H -плоскости и на 20° в E -плоскости. Диаграмма направленности при возбуждении антенны импульсом 0.5 нс уже. Как и в предыдущих наших работах [1], для измерения излученных импульсов использовалась приемная ТЕМ-антенна, представляющая собой половину ТЕМ-рупора с высотой раскрытия 8 см. Сигнал с выхода приемной ТЕМ-антенны регистрировался осциллографом LeCroy WaveMaster 830Zi с полосой пропускания 16 ГГц.

Диаграммы направленности по пиковой мощности решетки 2×2 приведены на рис. 10а для случая возбуждения импульсами с задержками, оптимизированными для максимальной амплитуды поля, на рис. 10б — для максимальной ширины спектра. Благодаря тому, что элементы, возбуждаемые импульсами одинаковой длительности, расположены по диагонали, максимумы диаграмм направленности расположены на оси ($\delta = \varphi = 0$), перпендикулярной плоскости решетки.

5. ИЗЛУЧЕНИЕ МОЩНЫХ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ИМПУЛЬСОВ

На рис. 11 приведены осциллограммы импульсов (rE), излученных комбинированными антеннами при возбуждении высоковольтными биполярными импульсами напряжения длительностью 0.5 и 1 нс, и их спектры. Измерения проводились в дальней зоне на расстоянии от решетки $r = 4.4$ м.

Измерив формы импульсов излучения (рис. 11) и их относительные задержки, мы рассчитали задержки, необходимые для получения синтезированных импульсов с максимальной амплитудой и максимальной шириной спектра. На рис. 12 приведена осциллограмма синтезированного импульса с задержками, оптимизированными для получения максимальной амплитуды поля, и его спектр, рассчитанный при помощи быстрого преобразования Фурье. Получены импульсы излуче-

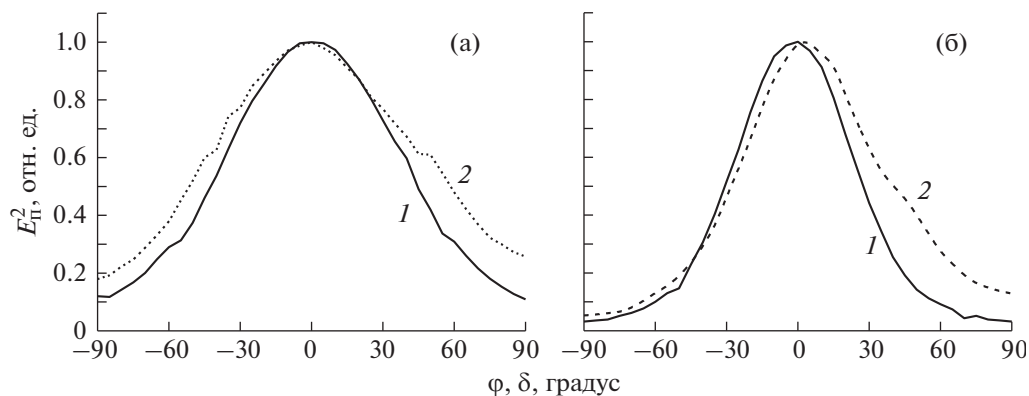


Рис. 9. Диаграммы направленности элемента решетки в H - (1) и E -плоскостях (2) при возбуждении биполярным импульсом напряжения длительностью 1 нс (а) и 0.5 нс (б).

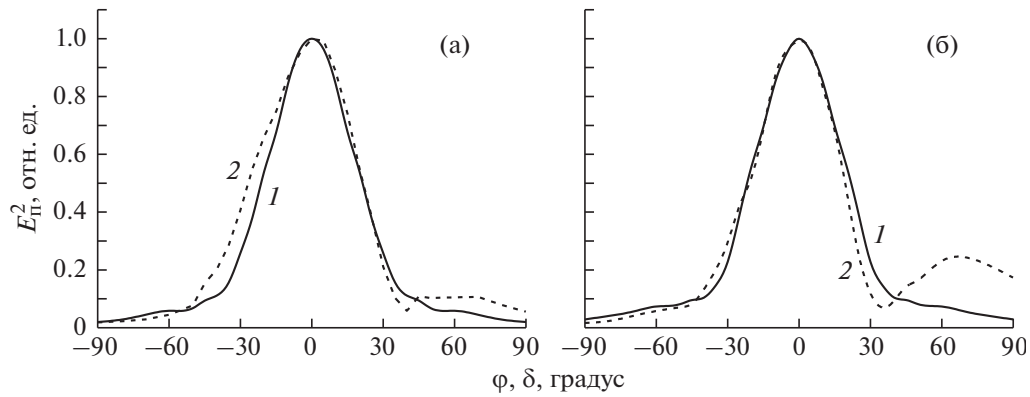


Рис. 10. Диаграммы направленности решетки 2×2 в H - (1) и E -плоскостях (2) при сложении импульсов, оптимизированном для максимальной амплитуды (а) и для максимальной ширины спектра (б).

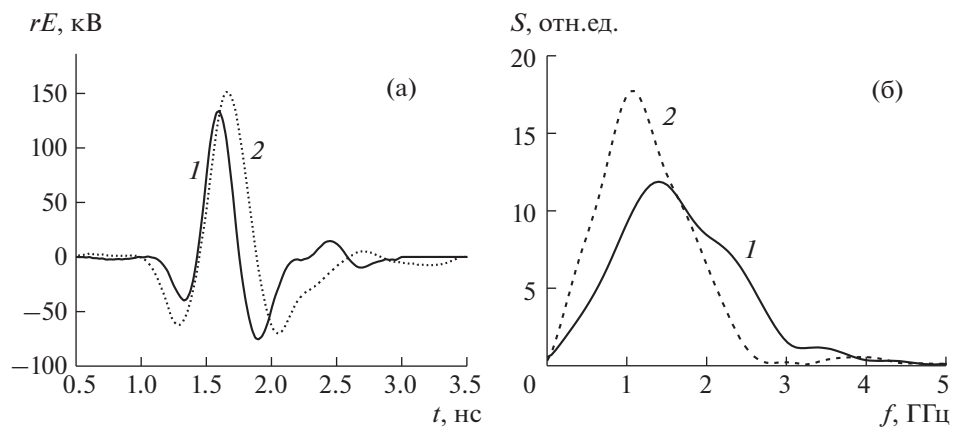


Рис. 11. Осциллограммы импульсов излучения (а) и их спектры (б) при возбуждении антенн биполярными импульсами напряжения длительностью 0.5 нс (1) и 1 нс (2).

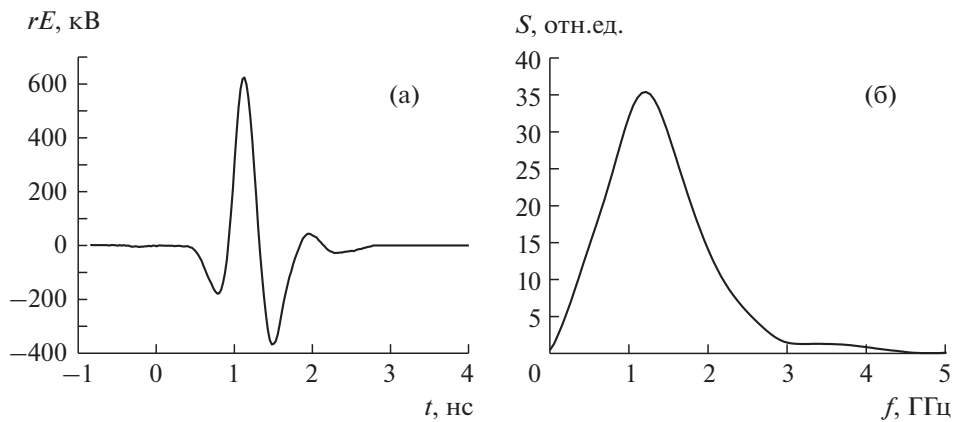


Рис. 12. Осциллограмма синтезированного импульса (а) при синхронизации по максимуму амплитуды и его спектр (б).

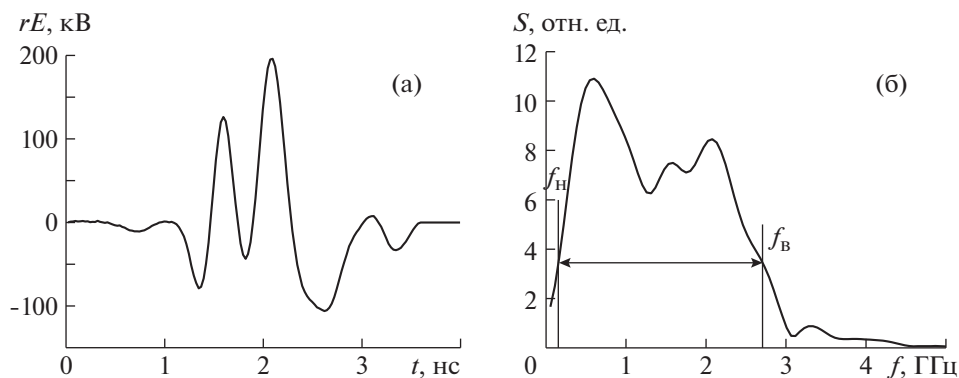


Рис. 13. Осциллограмма синтезированного импульса (а), излученного решеткой с задержками, оптимизированными для получения максимальной ширины спектра, и его спектр (б).

Таблица 2. Экспериментальные параметры мощных импульсов с.ш.п.-излучения

Импульс с.ш.п.-излучения	f_H , ГГц	f_B , ГГц	f_0 , ГГц	Δf , ГГц	$\Delta f/f_0$	$b = f_B/f_H$
0.5 нс	0.49	2.72	1.6	2.23	1.39	5.55
1 нс	0.33	2.07	1.2	1.74	1.45	6.27
0.5 + 1 нс, макс. амплитуда	0.39	2.13	1.26	1.74	1.38	5.46
0.5 + 1 нс, макс. спектр	0.15	2.7	1.43	2.55	1.79	18

ния с эффективным потенциалом (произведением пиковой напряженности электрического поля E_n на расстояние r в дальней зоне) $rE_n = 600$ кВ.

На рис. 13 приведена осциллограмма синтезированного импульса с задержками, оптимизированными для получения максимальной ширины спектра. Эффективный потенциал синтезированного излучения rE_n с расширенной полосой частот составляет 200 кВ. Пиковая плотность мощности излучения в главном направлении ($\delta = \varphi = 0$) на расстоянии 4.4 м составила 50 МВт/м² для варианта синхронизации импульсов с максимальной напряженностью поля и 5.5 МВт/м² для варианта с максимальной шириной спектра. Измеренные частотные характеристики импульсов приведены в табл. 2.

Ширина спектра Δf синтезированного импульса увеличена в 1.1–1.4 раза, а по отношению крайних частот в 2.9–3.2 раза. Отличие полученных экспериментальных результатов от численных расчетов (табл. 1) обусловлено различием модельных и измеренных форм импульсов излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан источник мощных импульсов синтезированного излучения на основе решетки 2×2 комбинированных антенн, возбуждаемых биполярными импульсами напряжения длительностью 0.5 и 1 нс. Реализовано два режима синтеза: максимальная напряженность поля и максималь-

ная ширина спектра. В первом режиме получены импульсы излучения с эффективным потенциалом 600 кВ, а во втором – 200 кВ. Режимы изменялись за счет изменения времени задержки между импульсами. Отношение крайних частот спектра синтезированного импульса во втором режиме было увеличено в 3 раза по сравнению с импульсами, излучаемыми комбинированными антеннами, возбуждаемыми биполярными импульсами одинаковой длительности.

Разработан новый четырехканальный формирователь биполярных импульсов разной длительности. На частоте повторения 100 Гц получены биполярные импульсы длительностью 0.5 и 1 нс с амплитудой до 80 кВ при разбросе 5–6% и временной нестабильности импульсов между каналами 50 пс.

Работа была поддержана Российским научным фондом, проект № 16-19-10081.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Koshelev V.I., Buyanov Yu.I., Belichenko V.P. Ultrawideband Short-Pulse Radio Systems. Boston/London: Artech House, 2017.
2. Giri D.V., Lackner H., Smith I.D., Morton D.V., Baum K.E., Marek J.R., Prather W.D., Scholfield D.W. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1997. V. 25. № 2. P. 318.
3. Andreev Yu.A., Buyanov Yu.I., Koshelev V.I., Plisko V.V., Sukhushin K.N. // Proc. Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 4. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999. P. 181.

4. *Efremov A.M., Koshelev V.I., Plisko V.V., Sevostyanov E.A.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2017. V. 88. № 9. P. 094705. doi 10.1063/1.5003418
5. *Koshelev V.I., Plisko V.V., Sevostyanov E.A.* // *J. Phys.: Conf. Series.* 2017. V. 830. P. 012012. doi 10.1088/1742-6596/830/1/012012
6. *Кошелев В.И., Плиско В.В., Севостьянов Е.А.* // *Изв. вузов. Физика.* 2017. Т. 60. № 8. С. 98.
7. *Andreev Yu.A., Gubanov V.P., Efremov A.M., Koshelev V.I., Korovin S.D., Kovalchuk B.M., Kremnev V.V., Plisko V.V., Stepchenko A.S., Sukhushin K.N.* // *Laser Part. Beams.* 2003. V. 21. № 2. P. 211. doi 10.1017/S0263034603212088
8. *Shpak V.G., Oulmascoulov V.R., Shunailov M.R., Yalandin M.I.* // *Proc. 12th IEEE Inter. Pulsed Power Conf.* 27–30 June, 1999. P. 692.
9. *Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М., Плиско В.В., Сухушин К.Н.* // *ПТЭ.* 2011. № 1. С. 77.
10. *Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М., Плиско В.В., Сухушин К.Н.* // *Радиотехника и электроника.* 2007. Т. 52. № 7. С. 813.
11. Federal Communication Comission USA (FCC) 02-48, ET Docket 98-153, First report and order, April 2002.