

АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ  
СИСТЕМЫ

УДК 621.373

СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ  
С РАЗНОЙ ЧАСТОТНОЙ ПОЛОСОЙ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ© 2020 г. А. М. Ефремов<sup>а</sup>, В. И. Кошелев<sup>а</sup> \*, В. В. Плиско<sup>а</sup><sup>а</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН,  
просп. Академический, 2/3, Томск, 634055 Российская Федерация

\*E-mail: koshelev@lhfe.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 01.07.2019 г.

После доработки 01.07.2019 г.

Принята к публикации 19.07.2019 г.

Исследован синтез электромагнитных импульсов с расширенным спектром сложением в свободном пространстве импульсов излучения с различным частотным диапазоном. Выполнена аналитическая оценка спектра излучения с максимальной шириной для решетки из комбинированных антенн, возбуждаемых биполярными импульсами длительностью 0.5, 1, 2 и 3 нс. Разработана комбинированная антенна с расширенной полосой согласования. Экспериментально показана возможность получения сверхширокополосного излучения с шириной спектра более четырех октав для решетки из комбинированных антенн, возбуждаемых биполярными импульсами длительностью 0.5, 1, 2 и 3 нс.

DOI: 10.31857/S0033849420050046

## ВВЕДЕНИЕ

Для исследований в таких областях [1], как радиолокация с распознаванием объектов, связь с высокой пропускной способностью, воздействие электромагнитных полей на объекты, включая биологические, необходимы источники сверхширокополосного (СШП) излучения с изменяемым спектром. Можно отметить несколько подходов к решению данной задачи [2–5].

Рассмотрим здесь только первый подход [2], который заключается в сложении СШП-импульсов с разным спектральным диапазоном в свободном пространстве при возбуждении элементов решетки биполярными импульсами разной длительности. Этот подход был развит в последующих работах [6–9]. Исследовали синтез электромагнитных импульсов в двух режимах: максимальная напряженность поля и максимальная ширина спектра излучения.

В экспериментах использовали решетки комбинированных антенн (КА) [10, 11]. Были созданы мощные источники синтезированного излучения на основе четырехэлементных решеток КА, возбуждаемых биполярными импульсами напряжения длительностью 2 и 3 нс [8], а также 0.5 и 1 нс [9]. Для получения симметричной диаграммы направленности (ДН) с максимумом поля на оси, антенны с одинаковой длительностью импульса располагали в решетке  $2 \times 2$  по диагонали.

Цель данной работы – исследование синтеза излучения при возбуждении четырехэлементной

решетки КА биполярными импульсами длительностью 0.5, 1, 2 и 3 нс, а также разработка мощного источника синтезированного СШП-излучения. Для этого требовалось разработать четырехканальный формирователь биполярных импульсов (ФБИ) с высокой амплитудой напряжения и стабильностью.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНТЕЗА  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Для того чтобы оценить характеристики синтезированных импульсов, были проведены численные расчеты. СШП-импульс, излученный КА, моделировался производной суммы двух гауссовых функций [6]:

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

где  $\tau$  – длительность биполярного импульса напряжения, возбуждающего антенну, по уровню 0.1 амплитуды. Рассчитанные значения напряженности поля нормировались к единице. Выражение (1) хорошо моделирует реальные импульсы  $E(t)$ , излученные КА и их спектры  $S(f)$ . Импульсы, рассчитанные по формуле (1), приведены на рис. 1а, а их спектры показаны на рис. 1б.

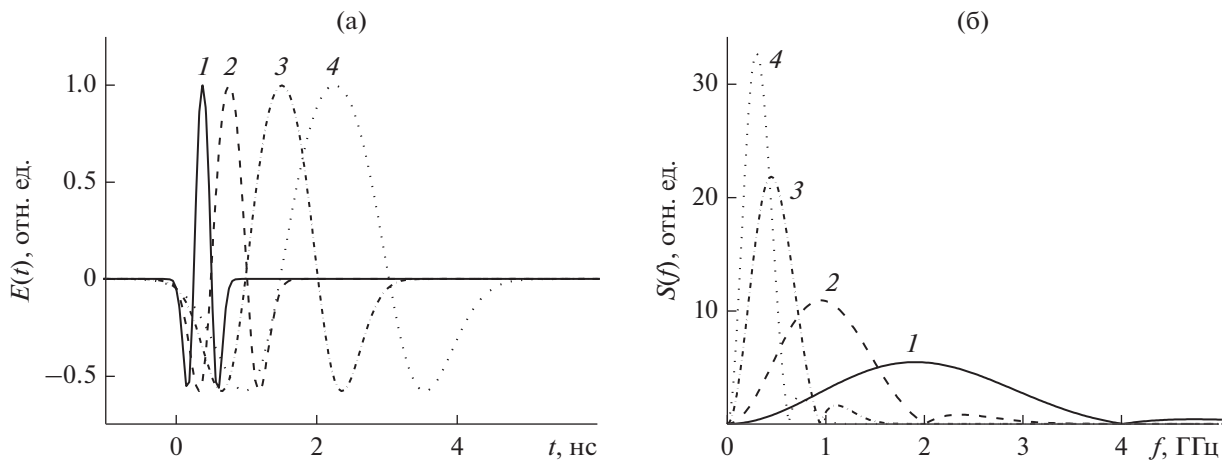


Рис. 1. Импульсы излучения (а), рассчитанные по формуле при возбуждении антенн биполярными импульсами на-пряжения длительностью 0.5 (1), 1 (2), 2 (3) и 3 нс (4), и их соответствующие спектры (б).

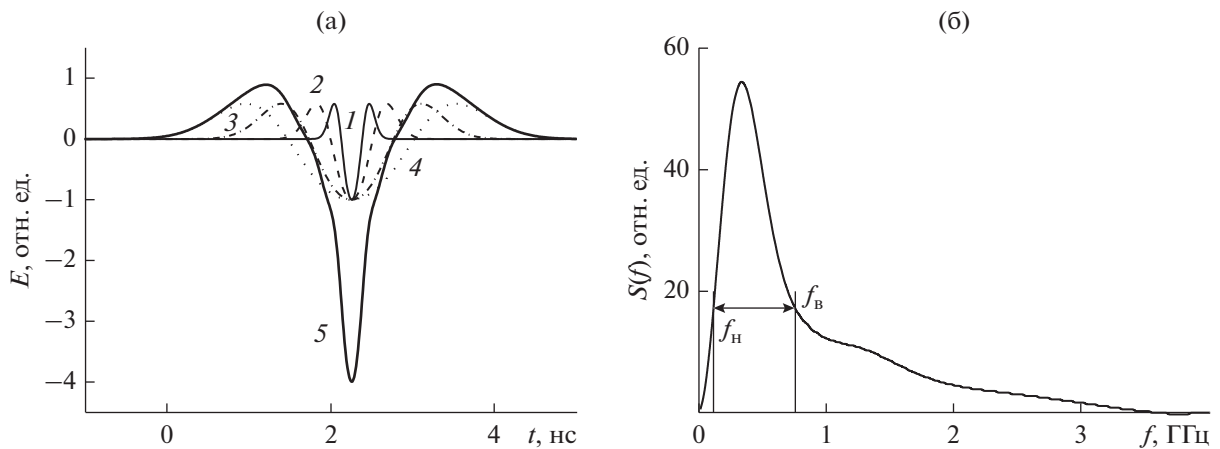


Рис. 2. Синхронизация импульсов по максимуму амплитуды: а) импульсы излучения от одиночных антенн длительностью 0.5 (1), 1 (2), 2 (3) и 3 нс (4) и суммарный импульс (5); б) спектр суммарного импульса излучения ( $f_в/f_н = 6.18$ ).

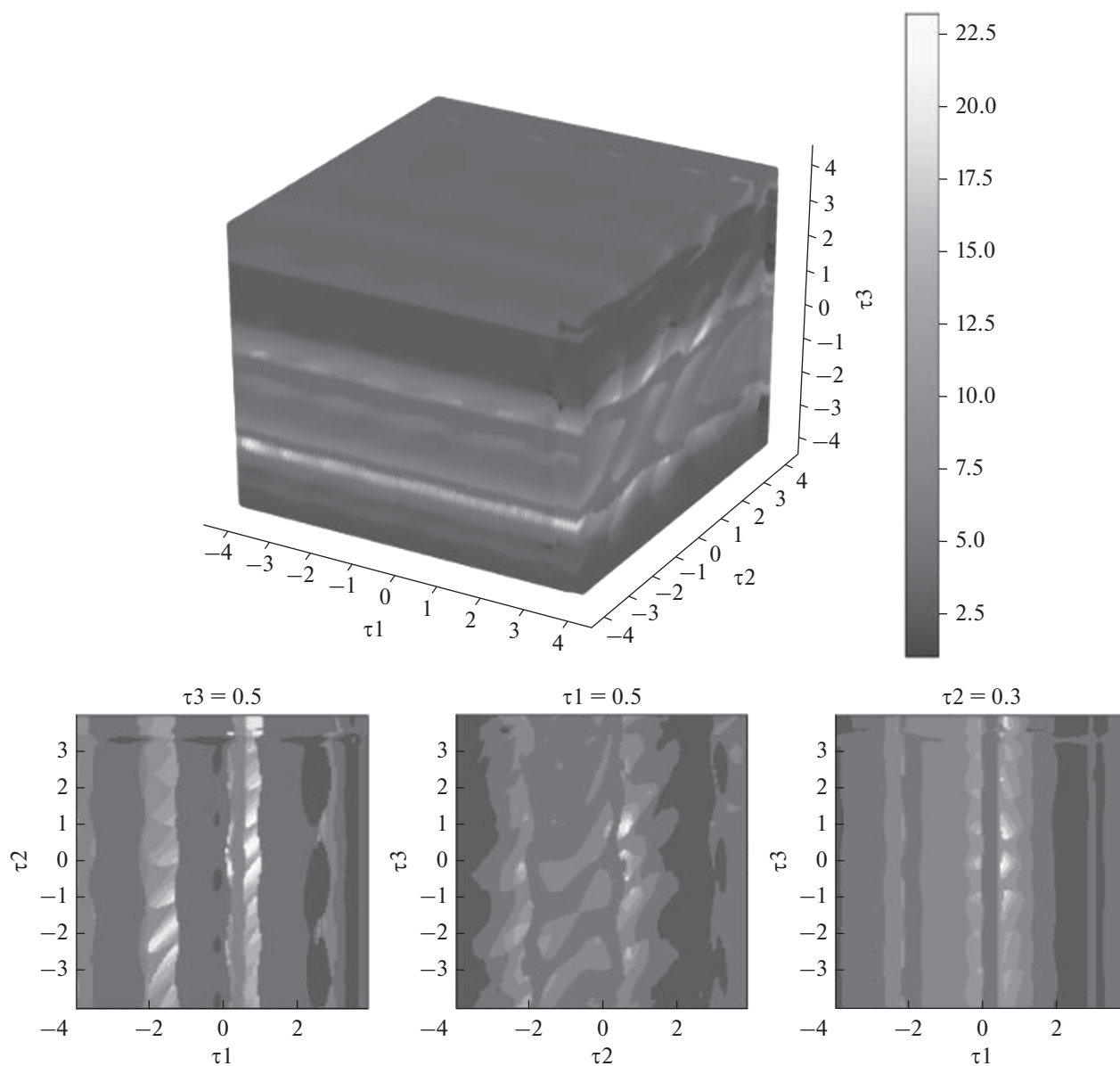
Результат сложения импульсов излучения зависит как от характеристик импульсов, так и от временных задержек между ними. Таким образом, изменяя задержку между импульсами излучения с разной длительностью (шириной спектра), можем получать импульсы с разными характеристиками: длительностью, амплитудой и шириной спектра. Спектр импульса характеризуется следующими параметрами [12]:

- 1) ширина спектра  $\Delta f = f_в - f_н$ , где  $f_н$  – нижняя, а  $f_в$  – верхняя граничные частоты спектра излучения, оцененные по уровню  $-10$  дБ;
- 2) относительная ширина спектра  $\Delta f/f_0$ , где  $f_0 = (f_в + f_н)/2$  – центральная частота спектра излучения;
- 3) отношение верхней и нижней граничных частот  $b = f_в/f_н$ .

В данной работе мы синтезировали импульсы излучения с максимальной амплитудой поля и максимальной шириной спектра. Ширину спектра импульса будем определять, в основном, по отношению верхней и нижней граничных частот  $b = f_в/f_н$ .

Максимальная пиковая напряженность поля соответствует синхронизации положительных максимумов импульсов (рис. 2) и реализуется при временных задержках  $\tau_1 = 1.882$  нс,  $\tau_2 = 1.505$  нс и  $\tau_3 = 0.752$  нс для биполярных импульсов длительностью 0.5, 1 и 2 нс соответственно, относительно импульса длительностью 3 нс. При этом амплитуды импульсов излучения складываются, а отношение верхней и нижней граничных частот суммарного импульса по сравнению с одиночными импульсами увеличивается примерно на 33%.

В опубликованных ранее исследованиях [8, 9] для анализа характеристик импульса излучения,



**Рис. 3.** Скриншот окна программы для визуализации зависимости отношения верхней и нижней граничных частот  $b(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = f_v/f_n$  от временных задержек.

синтезированного сложением двух импульсов с разной длительностью, мы строили зависимости пиковой напряженности поля и ширины спектра по уровню  $-10$  дБ от задержки между импульсами. В случае четырех импульсов с разной длительностью мы имеем дело с тремя задержками, поэтому визуальное отображение и анализ результатов становятся затруднительными. В этой связи была написана программа для расчета и отображения зависимости ширины спектра от задержек (рис. 3), которая позволяет в трехмерном массиве значений  $b(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = f_v/f_n$  выбирать сечения по одной из задержек.

Анализ данного массива значений показал, что он имеет сложную структуру с множеством

локальных экстремумов. Использование методов оптимизации *basin-hopping* [13], дифференциальной эволюции [14], симплицальной гомологической глобальной оптимизации [15] не позволило гарантированно находить глобальный максимум. Максимум ширины спектра находили методом перебора (равномерного поиска). Шаг перебора задержек был выбран равным  $0.05$  нс, так как это соответствует временной нестабильности источника высоковольтных импульсов. На рис. 4 показан результат сложения импульсов с задержками, найденными методом *basin-hopping*, а на рис. 5 – результат сложения импульсов с задержками, найденными методом перебора с шагом  $0.05$  нс. Уже с таким шагом метод перебора показал ре-

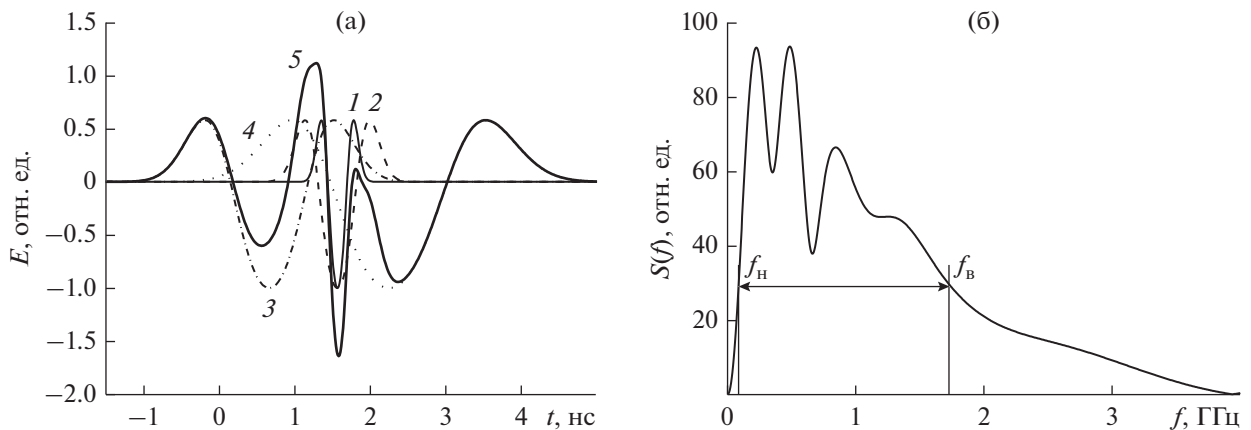


Рис. 4. Импульсы излучения от одиночных антенн (а) длительностью 0.5 (1), 1 (2), 2 нс (3) с соответствующими задержками 1.193, 0.817,  $-0.835$  нс относительно импульса длительностью 3 нс (4), рассчитанными методом basin-hopping, и суммарный импульс (кривая 5); а также спектр (б) суммарного импульса излучения ( $f_B/f_H = 20.47$ ).

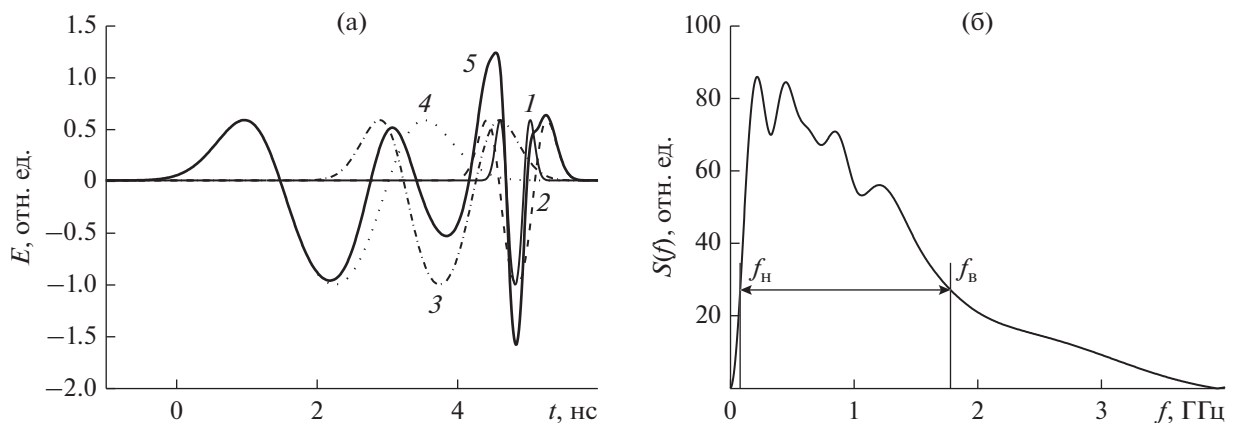


Рис. 5. Импульсы излучения от одиночных антенн (а) длительностью 0.5 (1), 1 (2), 2 нс (3) с соответствующими задержками 4.45, 4.1,  $-2.25$  нс относительно импульса длительностью 3 нс (4), рассчитанными методом перебора с шагом 0.05 нс, и суммарный импульс (кривая 5); а также спектр (б) суммарного импульса излучения ( $f_B/f_H = 22$ ).

зультат лучше, чем basin-hopping. По сравнению с одиночным импульсом отношение верхней и нижней граничных частот суммарного импульса увеличилось в 4.7 раза. В табл. 1 приведены частотные характеристики для одиночных импульсов (см. рис. 1) и суммарных импульсов для различных задержек.

## 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕШЕТКИ КОМБИНИРОВАННЫХ АНТЕНН

В качестве излучающей системы использовалась четырехэлементная решетка комбинированных антенн (КА) (рис. 6), оптимизированных для излучения биполярных импульсов длительностью 3 нс [16–18] и 2 нс [19]. Для излучения импульсов длительностью 1 и 0.5 нс была разработана новая КА (рис. 7), оптимизированная численным моделированием [20] для расширения полосы согласования в ВЧ-область. Эту антенну использовали для излучения биполярных импульсов длительностью как 1 нс, так и 0.5 нс. Ана-

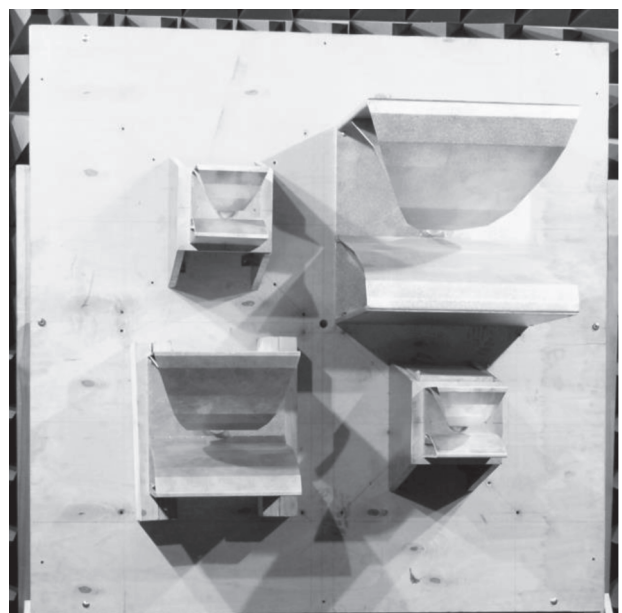


Рис. 6. Четырехэлементная антенная решетка.

**Таблица 1.** Параметры расчетных импульсов СШП-излучения

Импульс, нс	$f_H$	$f_B$	$f_0$	$\Delta f$	$\Delta f/f_0$	$b = f_B/f_H$
	ГГц					
0.5	0.664	3.074	1.869	2.41	1.289	4.632
1	0.332	1.537	0.934	1.205	1.29	4.632
2	0.166	0.769	0.467	0.603	1.290	4.636
3	0.11	0.512	0.312	0.402	1.291	4.643
Суммарный, макс. амплитуда	0.124	0.766	0.445	0.612	1.37	6.18
Суммарный, макс. спектр (basin–hopping)	0.084	1.728	0.906	1.64	1.81	20.47
Суммарный, макс. спектр (перебор)	0.081	1.78	0.93	1.7	1.83	22

логично [21] расширение полосы согласования удалось достичь уменьшением емкости в области коаксиально-полоскового перехода и изменением геометрии электродов антенны. На рис. 8 приведены рассчитанные и измеренные КСВН разработанной ранее КА [22] (далее – КА1), оптимизированной для излучения биполярных импульсов длительностью 1 нс, и новой антенны КА2 с расширенной полосой согласования.

Для исследования пространственно-временных характеристик антенн были использованы низковольтные биполярные импульсы напряжения. Для этих и последующих измерений излученных импульсов использовалась приемная *ТЕМ*-антенна, представляющая собой половину *ТЕМ*-рупора с высотой апертуры 8 см [23]. Сигнал с выхода приемной *ТЕМ*-антенны регистрировали осциллографом LeCroy WaveMaster 830Zi с полосой пропускания 16 ГГц.

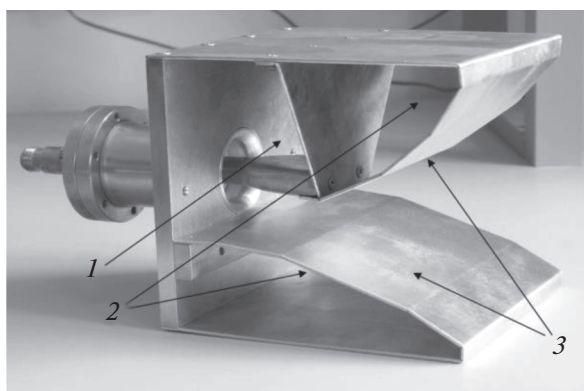
На рис. 9 показаны осциллограммы импульсов, излученных антеннами КА2 и КА1, возбуждаемыми биполярным импульсом длительностью

0.5 нс. Видно, что амплитуда импульса, излученного антенной КА2, увеличилась на 14%.

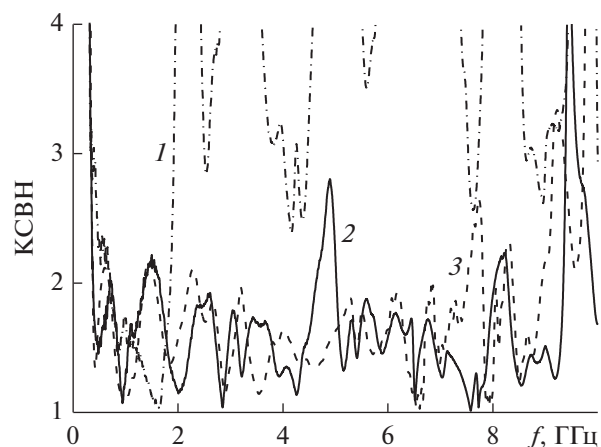
Для оценки энергетической эффективности антенны КА2 измерили отраженную от антенны энергию  $W_{отр}$  и рассчитали коэффициент по энергии  $K_3 = 1 - W_{отр}/W_r$ , где  $W_r$  – энергия импульса, подводимая к антенне от генератора. На вход антенны через согласованный ответвитель подавали биполярный импульс напряжения длительностью 1 или 0.5 нс и получили  $K_3 = 0.9$  и 0.94 соответственно. Отраженную энергию вычисляли также через КСВН и спектр возбуждающего импульса напряжения по соотношению

$$K_3 = 1 - \frac{W_{отр}}{W_r} = 1 - \frac{\int U_r^2(f) \left( \frac{K_H(f) - 1}{K_H(f) + 1} \right)^2 df}{\int U_r^2(f) df}, \quad (2)$$

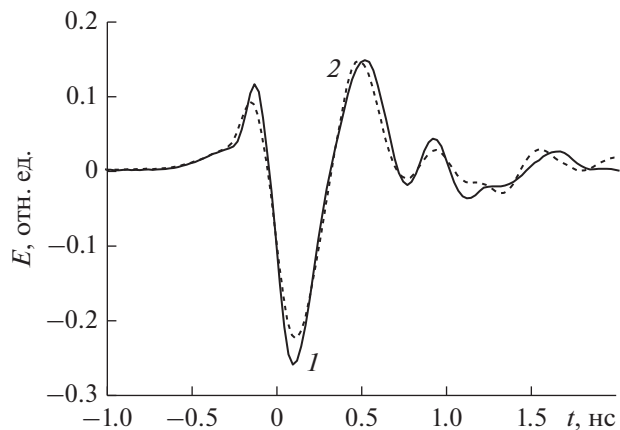
( $U_r(f)$  – спектр импульса напряжения генератора,  $K_H$  – КСВН) и получили  $K_3 = 0.9$  и 0.91 для 1 и 0.5 нс соответственно, что близко к результатам измерений.



**Рис. 7.** Комбинированная антенна для излучения биполярных импульсов длительностью 1 и 0.5 нс: 1 – активный магнитный диполь, 2 – пассивные магнитные диполи, 3 – *ТЕМ*-рупор.



**Рис. 8.** Измеренные (1, 2) и рассчитанные (3) КСВН комбинированных антенн КА1 (1) и КА2 (2, 3).

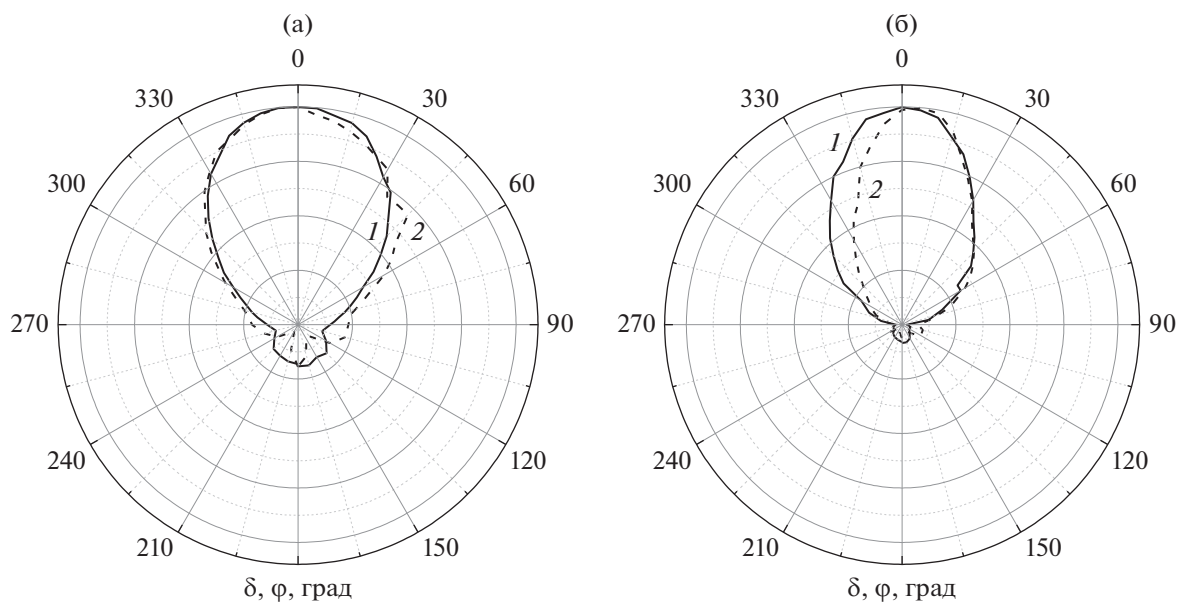


**Рис. 9.** Осциллограммы импульсов, излученных комбинированными антеннами КА2 (1) и КА1 (2) при возбуждении биполярным импульсом длительностью 0.5 нс.

Диаграмму направленности антенн в  $E$ - и  $H$ -плоскостях измеряли по пиковой мощности ( $E_p^2$ ) при возбуждении антенны биполярными импульсами длительностью 1 и 0.5 нс. При этом антенну КА2 вращали относительно ее геометрического центра, а неподвижная приемная  $TEM$ -антенна находилась на расстоянии 4 м от нее. При возбуждении биполярным импульсом длительностью 1 нс ширина ДН на полувысоте у антенны КА2 была примерно такой же, как и у КА1:  $98^\circ$  в  $H$ -плоскости и  $108^\circ$  в  $E$ -плоскости (рис. 10а), а при возбуждении антенны КА2 импульсом дли-

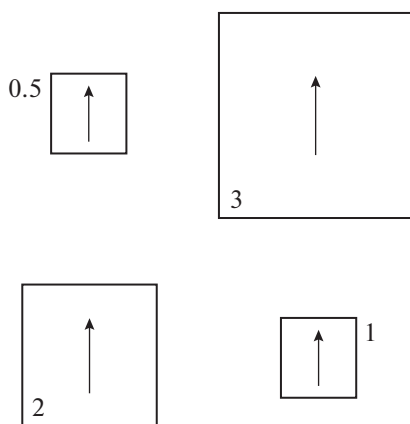
тельностью 0.5 нс – составила  $83^\circ$  в  $H$ -плоскости и  $69^\circ$  в  $E$ -плоскости (рис. 10б).

Было проведено моделирование ДН по пиковой мощности  $E_p^2$  для различных конфигураций решетки. ДН элементов полагали кардиоидными. Геометрический центр решетки совпадал с началом координат. Лучший результат получен для конфигурации решетки, показанной на рис. 11. Для режима синтеза с максимальной пиковой напряженностью поля получили практически симметричную ДН с максимумом в главном направлении ( $\varphi = \delta = 0$ ) (рис. 12а). Для режима синтеза с максимальной шириной спектра получили несимметричные ДН в  $H$ - и  $E$ -плоскостях (рис. 12б, кривые 1 и 2) с отклонением максимума диаграммы от главного направления решетки. Зависимость отношения крайних частот спектра излученного импульса от угла для  $H$ -плоскости показана на рис. 12б (кривая 3). Среднеквадратичное отклонение формы импульсов относительно формы импульса в главном направлении в  $H$ -плоскости, не превышает 20% в пределах  $\pm 5.5^\circ$  для режима с максимальной амплитудой и  $\pm 2.7^\circ$  для режима с максимальным спектром. Расчеты проводились аналогично [21]. Изменение отношения крайних частот в спектре излученного импульса не превышает 20% в диапазоне углов  $\pm 25^\circ$  и от  $-4.7^\circ$  до  $+3.3^\circ$  для режимов с максимальной амплитудой и максимальным спектром соответственно. Для  $E$ -плоскости получены близкие результаты. Среднеквадратичное отклонение формы импульсов относительно формы импульса в главном направлении не превышает 20% в пределах  $\pm 4.8^\circ$  и  $\pm 2.6^\circ$  для режи-



**Рис. 10.** Диаграммы направленности антенны КА2 в  $H$ - (кривые 1) и  $E$ -плоскостях (кривые 2) при возбуждении биполярным импульсом напряжения длительностью 1 (а) и 0.5 нс (б);  $\varphi$  – азимутальный угол,  $\delta$  – угол места, отсчитываемый от горизонтальной плоскости ( $\delta = 90^\circ - \theta$ ).





**Рис. 11.** Конфигурация решетки  $2 \times 2$ : стрелками показана плоскость поляризации вектора напряженности электрического поля, цифрами – длительность (в нс) биполярного импульса, возбуждающего элемент решетки.

мов с максимальной амплитудой и максимальным спектром соответственно. Изменение отношения крайних частот в спектре излученного импульса не превышает 20% в диапазоне углов  $\pm 22^\circ$  и от  $-6^\circ$  до  $+3.2^\circ$  для тех же режимов соответственно.

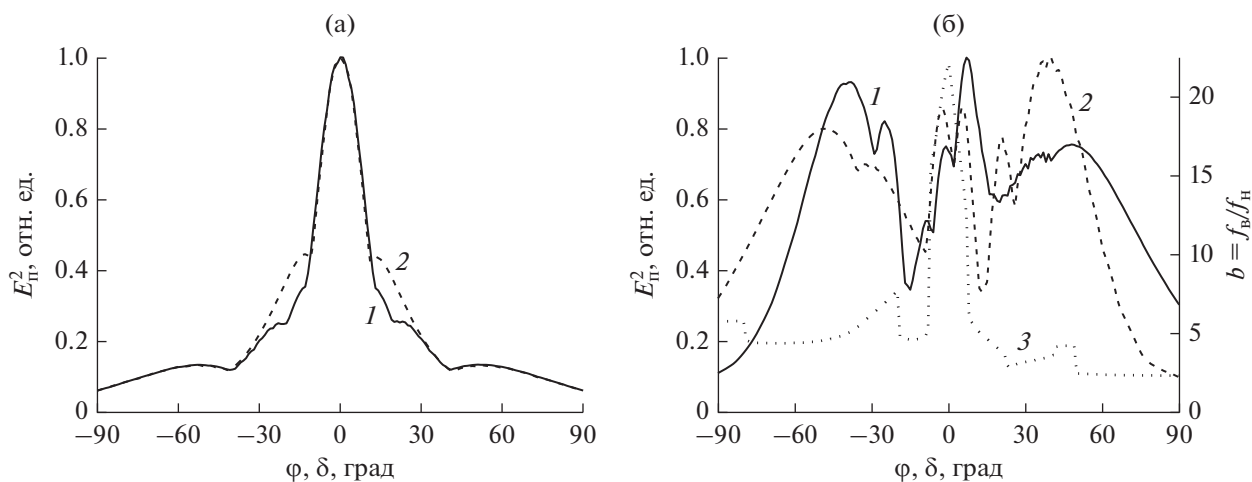
Моделирование показало, что для решетки  $2 \times 2$ , элементы которой возбуждаются биполярными импульсами разной длительности (0.5, 1, 2 и 3 нс), в режиме синтеза с максимальной шириной спектра невозможно получить ДН с максимумом в главном направлении решетки. Численные исследования показали, что разрешить эту проблему можно, используя большее количество элементов в решетке. Например, на рис. 13а показана конфигурация семиэлементной решетки КА и ее ДН (рис. 13б, кривая 1) для режима синтеза с макси-

мальной шириной спектра. Амплитуды импульсов излучения при возбуждении антенн биполярными импульсами длительностью 0.5, 1 и 2 нс составляли половину амплитуды импульса излучения при возбуждении антенны биполярным импульсом длительностью 3 нс. Так как решетка симметричная, то ДН в  $E$ - и  $H$ -плоскостях совпадают. Зависимость отношения крайних частот спектра излученного импульса от угла для обеих плоскостей показана на рис. 13б (кривая 2). Для семиэлементной решетки (см. рис. 13а) среднеквадратичное отклонение формы импульсов относительно формы импульса в главном направлении не превышает 20% в пределах  $\pm 4.5^\circ$  для режима с максимальной амплитудой и  $\pm 3^\circ$  для режима с максимальным спектром. Изменение отношения крайних частот в спектре излученного импульса не превышает 20% в диапазоне углов  $\pm 13^\circ$  и  $\pm 5^\circ$  для тех же режимов соответственно.

### 3. СИНТЕЗ ИМПУЛЬСОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Для исследования синтеза импульсов излучения на низком напряжении использовались генераторы и модуль запуска производства фирмы “Трим” (<http://trimcom.ru>). Модуль запуска позволяет управлять задержками запуска генераторов с временным шагом 10 пс. Были рассчитаны задержки запуска импульсов напряжения для получения синтезированных импульсов излучения с максимальной амплитудой и максимальным спектром.

Осциллограммы импульсов, излученных КА, возбуждаемыми низковольтными генераторами биполярных импульсов длительностью 0.5, 1, 2 и 3 нс, показаны на рис. 14а, а их спектры – на



**Рис. 12.** Диаграмма направленности для режима синтеза с максимальной пиковой напряженностью поля (а) и шириной спектра (б) в  $H$ - (кривые 1) и  $E$ -плоскостях (кривые 2), а также зависимость отношения граничных частот спектра от угла для  $H$ -плоскости (кривая 3).

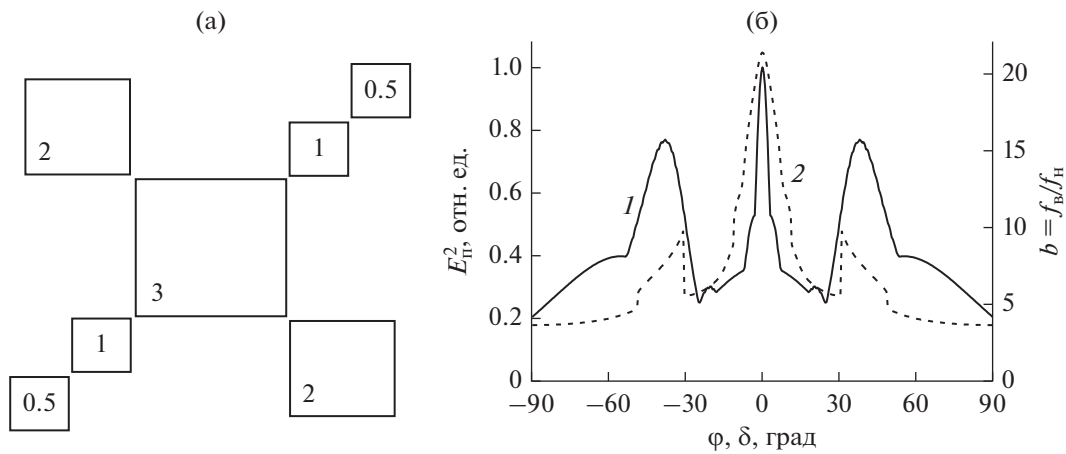


Рис. 13. Семиэлементная решетка: а – конфигурация, б – ДН в  $E$ - и  $H$ -плоскостях (кривая 1) и зависимость отношения граничных частот спектра излучения от угла (кривая 2) для режима синтеза с максимальной шириной спектра.

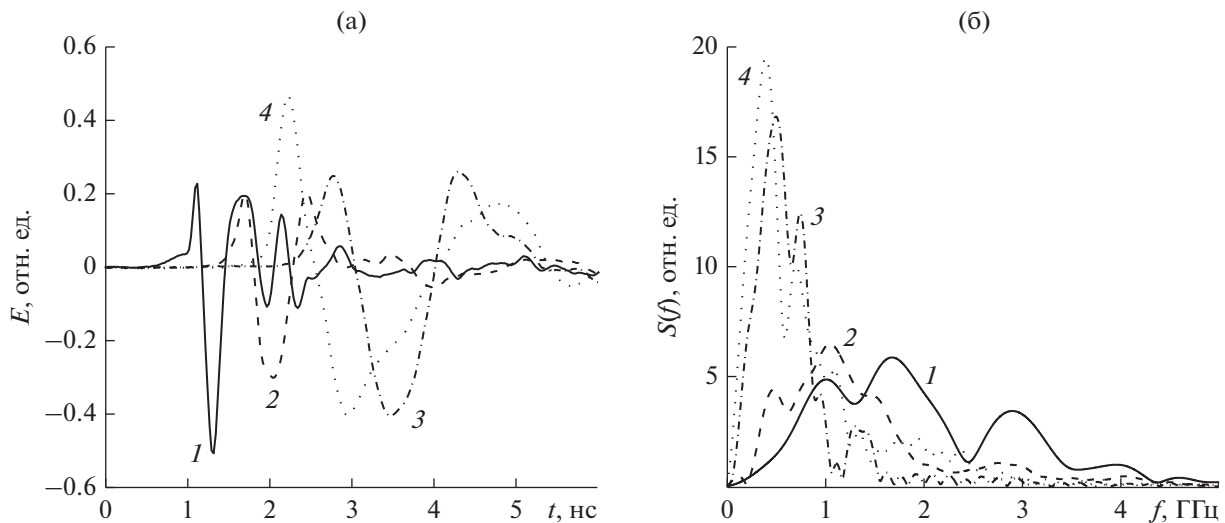


Рис. 14. Импульсы, излученные комбинируемыми антеннами при возбуждении антенн биполярными импульсами напряжения (а), длительностью 0.5 (1), 1 (2), 2 (3) и 3 нс (4), и их спектры (б).

рис. 146. Измерения проводили в главном направлении на расстоянии от решетки  $r = 4.4$  м.

На рис. 15 показана осциллограмма синтезированного импульса излучения с задержками, оптимизированными для получения максимальной амплитуды, и его спектр. Ширина спектра  $\Delta f$  такого импульса отличается от ширины спектра исходных импульсов в среднем в 1.8 раза. На рис. 16 представлена осциллограмма синтезированного импульса излучения с временными задержками, оптимизированными для получения максимальной ширины спектра, и его спектр. В этом случае ширина спектра  $\Delta f$  синтезированного импульса увеличена в 1.3–2 раза, а по отношению крайних частот в 4 раза. Частотные характеристики импульсов излучения низкой мощности приведены в табл. 2.

#### 4. ИЗЛУЧЕНИЕ МОЩНЫХ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ИМПУЛЬСОВ

Ранее нами были созданы четырехканальные ФБИ с длительностью биполярных импульсов 3 и 2 нс [8] и 1 и 0.5 нс [9]. Эти формирователи, собранные по схеме с разомкнутой линией [24], способны работать при частоте повторения импульсов до 100 Гц с амплитудами до 80 кВ. Среднеквадратичные разбросы задержек моментов перехода биполярных импульсов через ноль между каналами не превышали 100 пс.

В данной работе для формирования биполярных импульсов длительностью 3, 2, 1 и 0.5 нс мы объединили в новом ФБИ обе схемы [8, 9].

Данный ФБИ (рис. 17) состоит из генератора высоковольтных монополярных импульсов



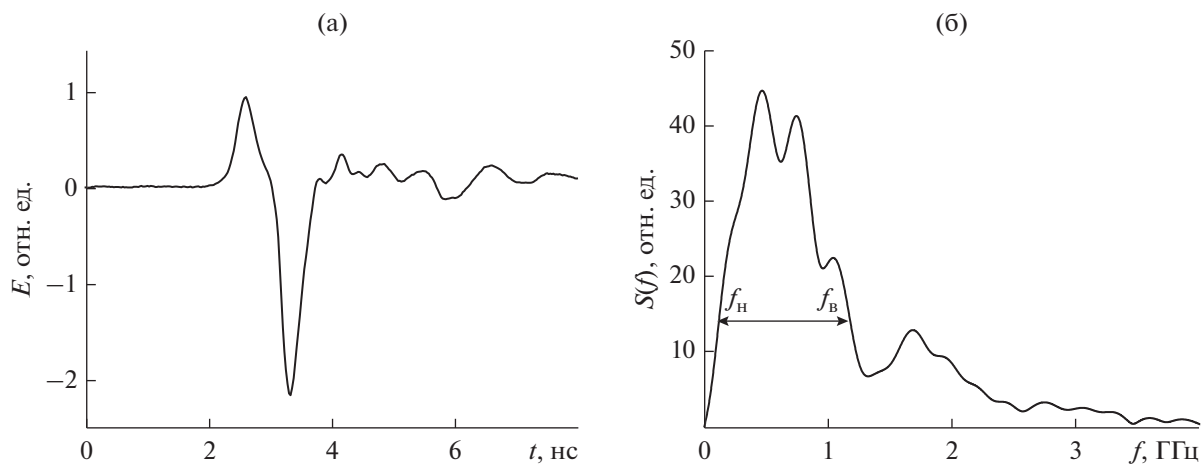


Рис. 15. Осциллограмма импульса, излученного решеткой с задержками, оптимизированными для получения максимальной амплитуды поля (а), и его спектр (б).

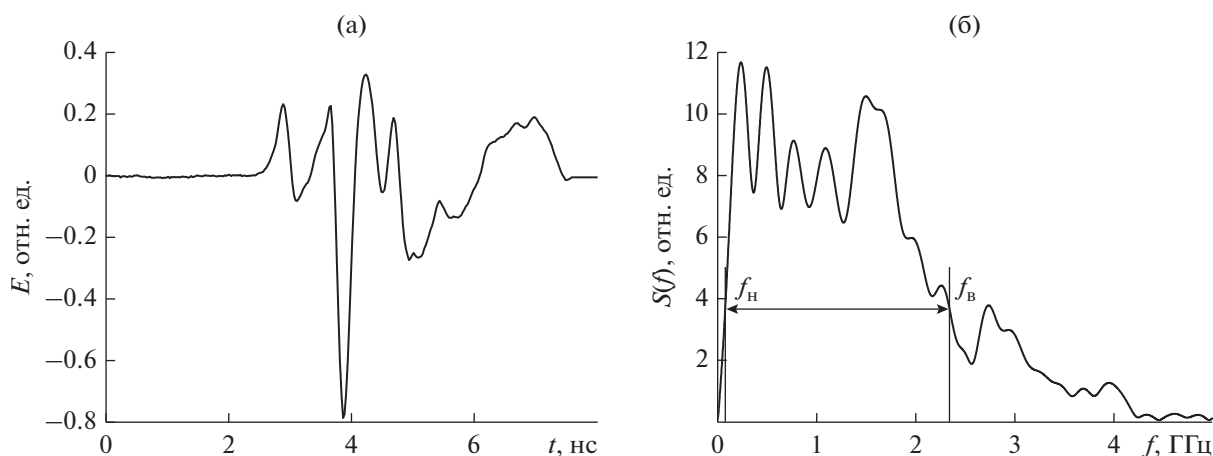


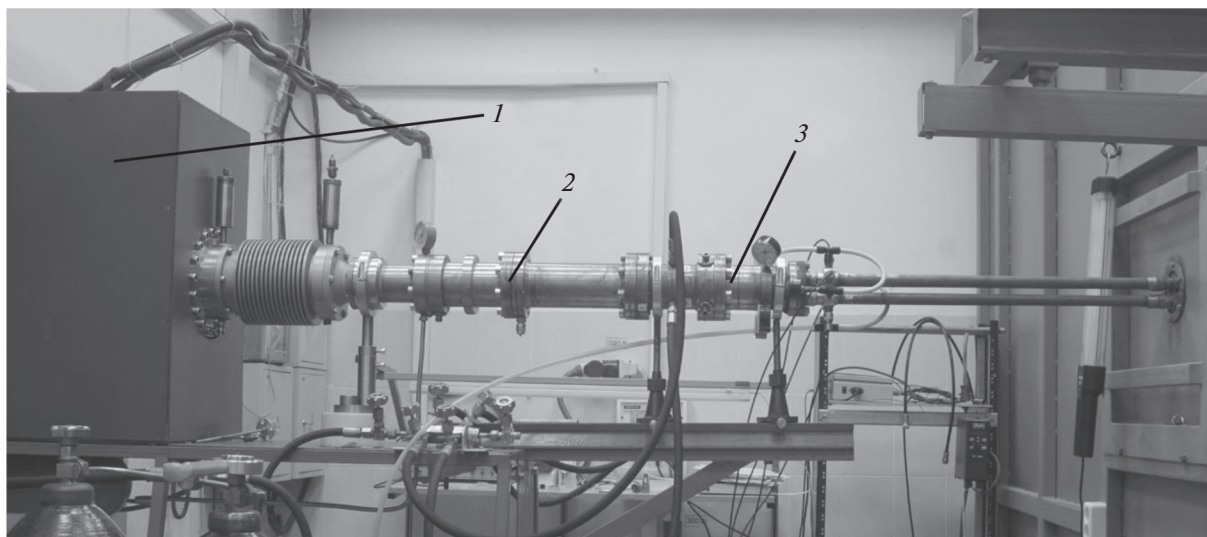
Рис. 16. Осциллограмма импульса, излученного решеткой с задержками, оптимизированными для получения максимальной ширины спектра (а), и его спектр (б).

СИНУС-160 (1), промежуточной ступени обострения (2) и четырех каналов ФБИ (3). На принципиальной схеме генератора биполярных импульсов напряжения (рис. 18) генератор СИНУС-160 представлен выходной формирующей линией FL

и разрядником S. Эта линия заряжалась от вторичной обмотки трансформатора Тесла до напряжения  $-360$  кВ с частотой следования импульсов  $100$  Гц и коммутировалась разрядником S через разделительную линию FL<sub>1</sub> и ограничительное

Таблица 2. Параметры импульсов СШП-излучения низкой мощности

Импульс, нс	$f_H$	$f_B$	$f_0$	$\Delta f$	$\Delta f/f_0$	$b = f_B/f_H$
	ГГц					
0.5	0.569	2.32	1.444	1.751	1.21	4.08
1	0.31	1.77	1.04	1.46	1.4	5.71
2	0.17	0.86	0.515	0.69	1.34	5.06
3	0.117	0.9	0.508	0.783	1.54	7.69
Суммарный, макс. амплитуда	0.119	1.18	0.65	1.06	1.63	9.91
Суммарный, макс. спектр	0.074	2.34	1.133	2.266	2	31.6



**Рис. 17.** Четырехканальный генератор биполярных импульсов напряжения: 1 – генератор высоковольтных монополярных импульсов СИНУС-160, 2 – промежуточная ступень обострения, 3 – четыре канала формирователя биполярных импульсов.

сопротивление  $R$  на линию  $FL_2$  промежуточной ступени обострения.

Формирователи собраны по схеме с разомкнутой линией. Каналы  $F_0...F_3$  формируют биполярные импульсы напряжения с длительностями 0.5, 1, 2 и 3 нс на нагрузках  $R_{10}...R_{13}$  соответственно по 50 Ом каждая. Линия  $FL_2$  одновременно выполняет функцию формирующей линии для каналов  $F_2$  и  $F_3$  и как промежуточный накопитель для каналов  $F_0$  и  $F_1$ . При срабатывании разрядника  $S_1$  при напряжении, близком к максимальному по линии  $FL_3$  распространяется падающая волна напряжения, которая через четырехканальный делитель поступает в каналы  $F_0...F_3$ . При срабатывании срезающих разрядников  $S_{22}$  и  $S_{23}$  с задержками, равными двойным пробегам в линиях  $FL_{62}$  и  $FL_{63}$ , формируются биполярные импульсы длительностью 2 и 3 нс в нагрузках  $R_{12}$  и  $R_{13}$  соответственно. Фронты падающих волн в линиях  $FL_{40}$ ,  $FL_{41}$ ,  $FL_{50}$  и  $FL_{51}$  недостаточны для формирования биполярных импульсов длительностью 0.5 и 1 нс, поэтому в каналах  $F_0$  и  $F_1$  установлены обостряющие разрядники  $S_{10}$  и  $S_{11}$ . При срабатывании этих разрядников в нагрузках  $R_{10}$  и  $R_{11}$  формируются отрицательные полуволны биполярных импульсов длительностью 0.5 и 1 нс соответственно. Положительные полуволны этих импульсов формируются при коммутации срезающих разрядников  $S_{20}$  и  $S_{21}$  с относительными задержками времени, равными двойным пробегам по линиям  $FL_{60}$  и  $FL_{61}$  соответственно. Чтобы исключить взаимное влияние разрядников на формирование импульсов в соседних каналах, введены разделительные линии

$FL_{40}$  и  $FL_{41}$ . Волновые сопротивления и длительности разделительных линий подобраны таким образом, чтобы иметь более высокое зарядное напряжение линий  $FL_{50}$  и  $FL_{51}$  с расчетным фактором  $K = 1.3...1.5$  [25].

Конструкция промежуточной ступени обострения и каналов ФБИ  $F_0$  и  $F_3$  представлена на рис. 19. Оси четырех каналов  $F_0...F_3$  расположены в диаметрально противоположных точках на окружности с диаметром 53 мм. Конструкция каналов формирования  $F_1$  и  $F_2$  аналогична конструкции каналов  $F_0$  и  $F_3$  соответственно, однако величины электрических длин линий различаются (см. рис. 18).

Конструкция 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 идентичных независимых объемах с внутренними диаметрами 25 мм, ограниченных изоляторами 1 и 2, в среде азота под давлениями 23...45 атм расположены линии  $FL_{40}$ ,  $FL_{41}$ ,  $FL_{50}...FL_{53}$ ,  $FL_{60}...FL_{63}$ ,  $FL_{70}...FL_{73}$ , разрядники  $S_{10}$ ,  $S_{11}$  и  $S_{20}...S_{23}$ . Линии  $FL_{70}...FL_{73}$  имеют изоляцию из капролона. Electroдами кольцевого разрядника  $S_1$  являются концы внутренних проводников линий  $FL_2$  и  $FL_3$ . Межэлектродный зазор в разряднике  $S_1$  равен 1.4 мм. Electroды обостряющих разрядников  $S_{10}$  и  $S_{11}$  встроены в концы линий  $FL_{50}$ ,  $FL_{51}$ ,  $FL_{60}$ ,  $FL_{61}$ , межэлектродные расстояния равны 1...1.4 мм.

В отличие от четырехканального ФБИ длительностью 0.5 и 1 нс [9] кольцевые electroды разрядников  $S_{10}$  и  $S_{11}$  заменены здесь на полусфе-

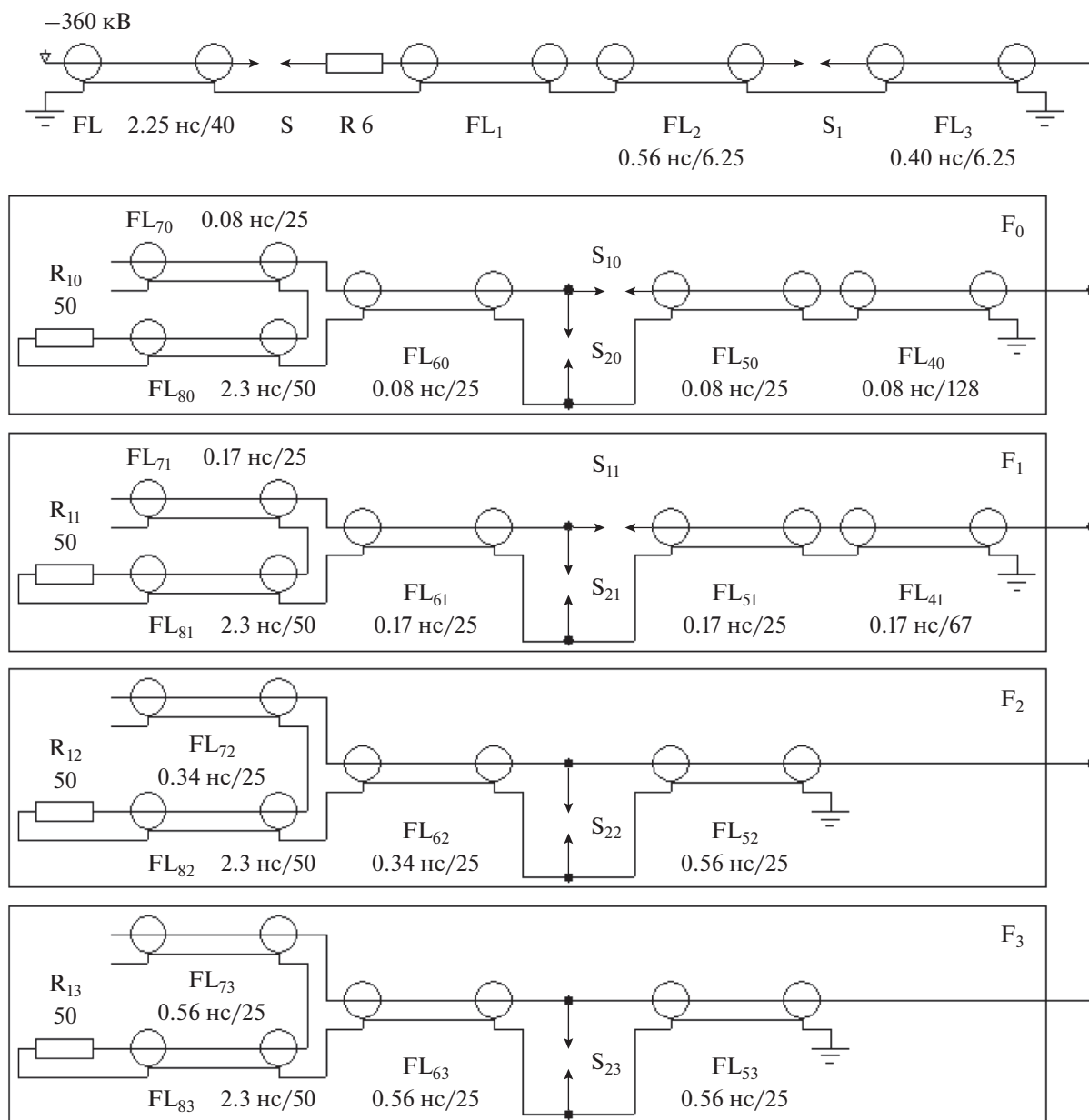


Рис. 18. Принципиальная комбинированная схема четырехканального генератора биполярных импульсов: FL – коаксиальные линии; S – разрядники; R – сопротивления.

рические, что позволило уменьшить проходные емкости этих разрядников и, как следствие, уменьшить амплитуды предимпульсов на выходе этих каналов. Electroдами срезающих разрядников  $S_{20} \dots S_{23}$  служат диски 3 толщиной 2 мм и цилиндрические вставки, установленные на наружных проводниках линий  $FL_{60} \dots FL_{63}$  с зазорами 0.7 мм. Материал электродов разрядников  $S_1, S_{10}, S_{11}$  и  $S_{20} \dots S_{23}$  – медь. Идентичные по конструкции передающие линии  $FL_{80} \dots FL_{83}$  с встроенными делителями напряжения на связанных линиях  $D_{20} \dots D_{23}$  имеют элазговую изоляцию под давле-

нием 5 атм. Система на основе программируемых датчиков давлений модели PSD-30 и десяти клапанов напуска и сброса осуществляла автоматический контроль и регулировку давлений азота в объеме промежуточной ступени обострения и объемах каналов  $F_0 \dots F_3$ .

Импульс зарядного напряжения на линию  $FL_2$  поступал от генератора СИНУС-160 по линии  $FL_1$ , а выходные биполярные импульсы после срабатывания разрядников  $S_1, S_{10}, S_{11}$  и  $S_{20} \dots S_{23}$  передавались по четырем передающим линиям  $FL_{80} \dots FL_{83}$  с волновым сопротивлением 50 Ом

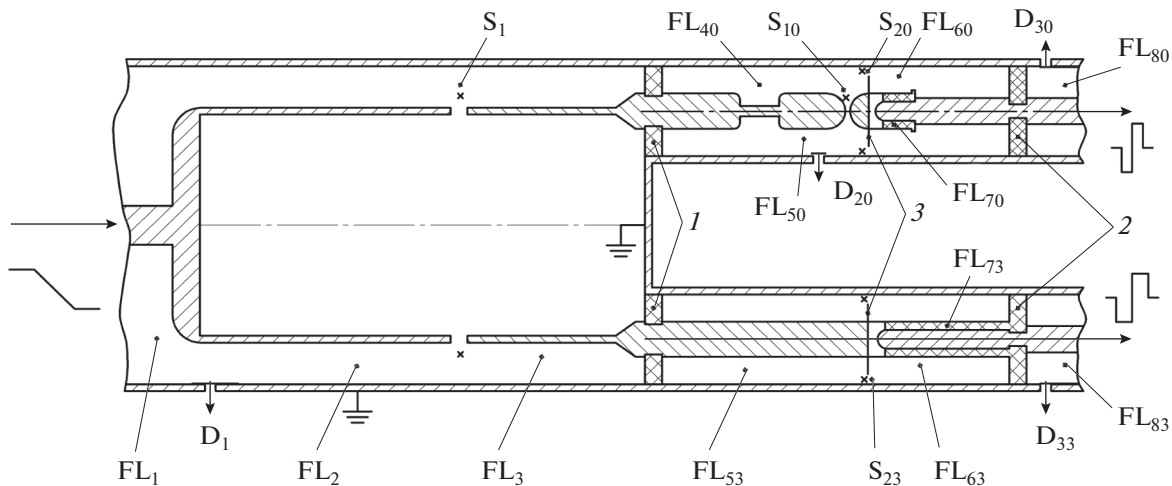


Рис. 19. Схема промежуточной ступени обострения и четырехканального формирования биполярных импульсов: 1, 2 – изоляторы, 3 – диск, FL – коаксиальные линии, S – разрядники, D – делители напряжения.

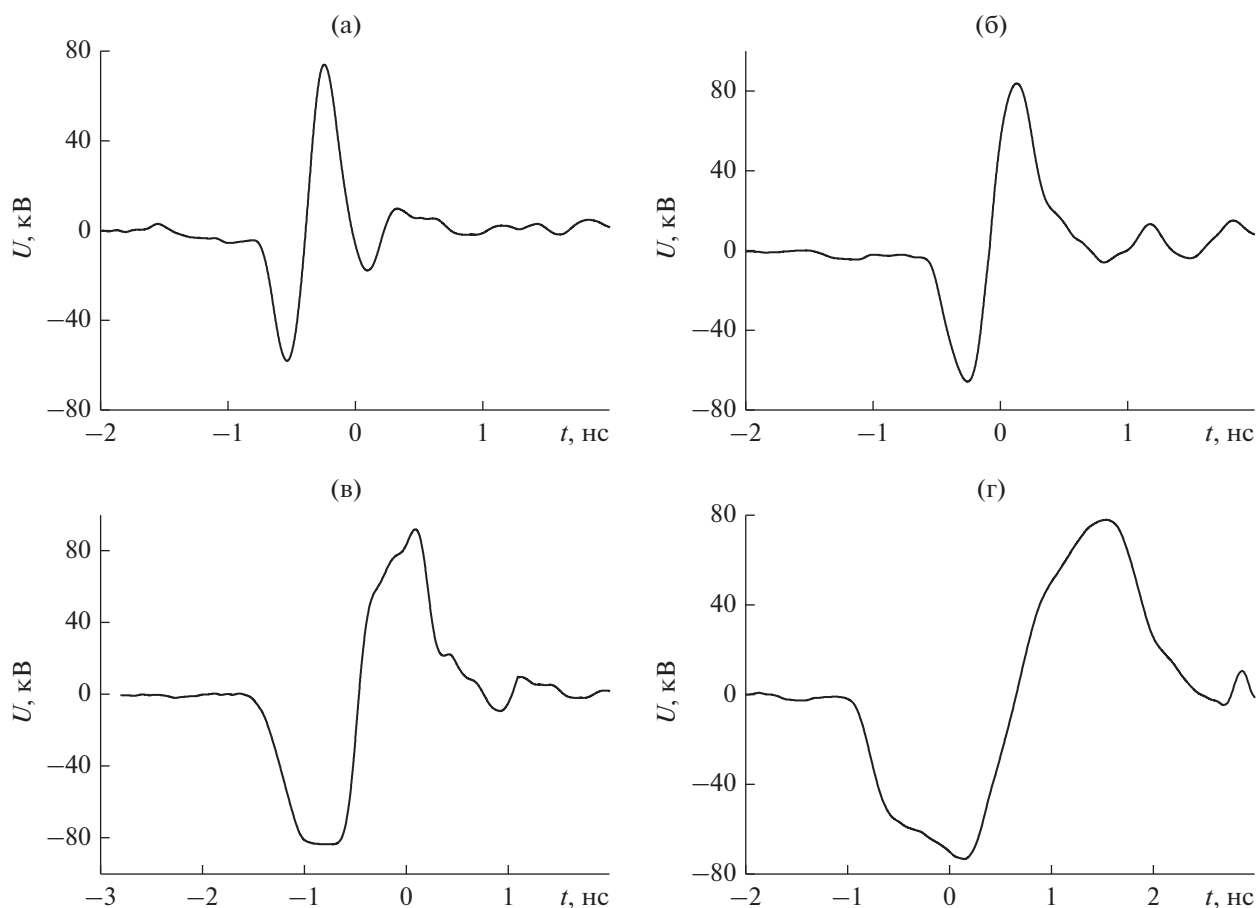


Рис. 20. Биполярные импульсы напряжения, полученные с делителей  $D_{30}$  (а),  $D_{31}$  (б),  $D_{32}$  (в),  $D_{33}$  (г).

каждая в согласованные резистивные нагрузки, либо в передающие антенны. Для регистрации выходных биполярных импульсов с делителей напряжения  $D_{30} \dots D_{33}$  и импульсов зарядных напряжений  $D_1, D_{20}, D_{21}$  на линиях  $FL_2, FL_{50}, FL_{51}$  соответственно использовался осциллограф TDS

6604 с частотной полосой до 6 ГГц. Делители  $D_{30} \dots D_{33}$  калибровались с помощью подачи биполярных импульсов напряжения с длительностями 0,5, 1, 2 и 3 нс на входы линий  $FL_{80} \dots FL_{83}$  от низковольтных генераторов. Эксперимент показал хорошее согласие форм импульсов на выходах линий

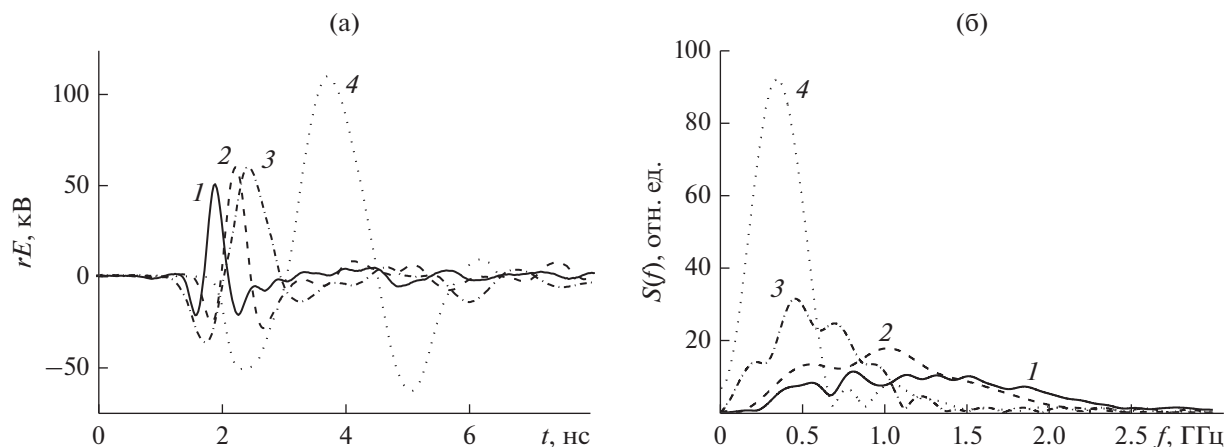


Рис. 21. Осциллограммы импульсов излучения (а) и их спектры (б) при возбуждении антенн биполярными импульсами напряжения длительностью 0.5 (1), 1 (2), 2 (3) и 3 нс (4).

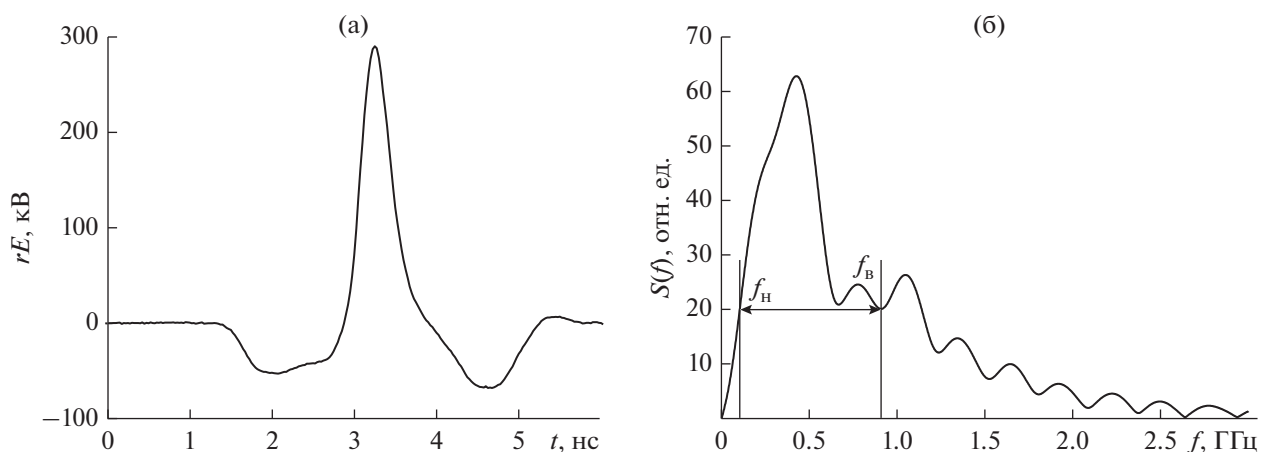


Рис. 22. Осциллограмма синтезированного импульса (а) при синхронизации по максимуму амплитуды поля и его спектр (б).

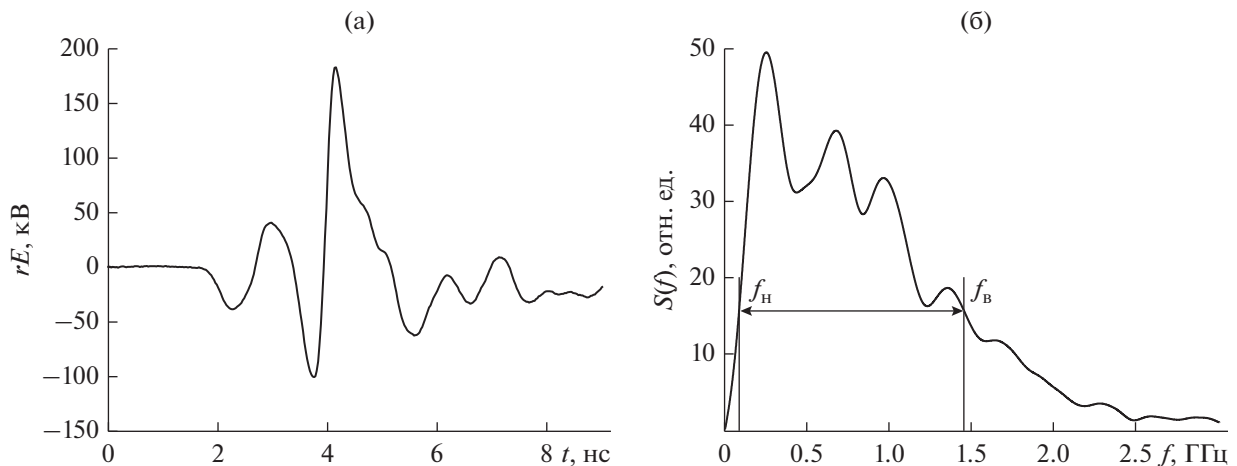
и восстановленных с коэффициентом ослабления 65 импульсов с делителей напряжения  $D_{30} \dots D_{33}$ . Емкостные делители  $D_{20}$  и  $D_{21}$  не калиброваны и служат для оценки времени зарядки напряжения на линиях  $FL_{50}$  и  $FL_{51}$  соответственно.

Разрядник  $S_1$  пробивался с задержкой 4.3 нс при зарядном напряжении 170 кВ. Регулировкой давлений и зазоров в разрядниках  $S_{10}$ ,  $S_{11}$  и  $S_{20} \dots S_{23}$  добивались симметричных форм биполярных импульсов напряжения с делителей  $D_{30} \dots D_{33}$ . При этом времена зарядки линий  $FL_{50}$ ,  $FL_{51}$  до моментов коммутации разрядников  $S_{10}$ ,  $S_{11}$  составили 800...950 пс. Выходные биполярные импульсы, полученные с делителей  $D_{30} \dots D_{33}$ , показаны на рис. 20. Импульсы имеют амплитуды до  $\pm 80$  кВ и длительности 0.5, 1, 2 и 3 нс при частоте следования 100 Гц. Длительность импульсов определялась путем аппроксимации передних и задних фронтов до пересечений с нулевыми линиями. Среднеквадратичные разбросы задержек момен-

тов перехода через ноль биполярных импульсов между каналами не превышает 50 пс. При среднеквадратичном разбросе амплитуды зарядного напряжения генератора СИНУС-160 относительно средней около 1% среднеквадратичный разброс амплитуд биполярных импульсов относительно средней для всех каналов  $F_0 \dots F_3$  составляет не более 4...5%.

На рис. 21 показаны осциллограммы импульсов ( $rE$ ), излученных КА при возбуждении высоковольтными биполярными импульсами напряжения длительностью 0.5, 1, 2 и 3 нс, и их спектры. Измерения проводили в главном направлении на расстоянии от решетки  $r = 4$  м.

Получив осциллограммы импульсов излучения (см. рис. 21), мы рассчитали временные задержки, необходимые для получения синтезированных импульсов с максимальной амплитудой поля и максимальной шириной спектра излучения. На рис. 22 приведена осциллограмма синтезированного импульса с задержками, оптимизированными для



**Рис. 23.** Осциллограмма синтезированного импульса (а), излученного решеткой с задержками, оптимизированными для получения максимальной ширины спектра, и его спектр (б).

получения максимальной амплитуды поля, и его спектр. Получены импульсы излучения с произведением пиковой напряженности электрического поля  $E_n$  на расстояние  $r$ , равным  $rE_n = 290$  кВ. Отношение верхней и нижней граничных частот при этом составило 8.9. На рис. 23 приведена осциллограмма синтезированного импульса с задержками, оптимизированными для получения максимальной ширины спектра излучения, и его спектр. Величина  $rE_n$  для синтезированного излучения с расширенной полосой частот составляет 185 кВ, а нестабильность по максимуму амплитуды равна  $\sigma = 9\%$ . Отношение крайних частот по уровню  $-10$  дБ составило 16.9. Измеренные частотные характеристики импульсов приведены в табл. 3.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построена численная модель синтеза импульсов излучения с помощью сложения в свободном пространстве импульсов с различной шириной спектра. По результатам расчетов выбрана оптимальная конфигурация четырехэлементной решетки, возбуждаемой биполярными импульсами длительностью 0.5, 1, 2 и 3 нс. Показана возможность увеличения отношения крайних частот в спектре импульса синтезированного излучения до 22.

В экспериментальных исследованиях синтеза излучения малой мощности получены импульсы с отношением крайних частот до 10 в режиме максимальной амплитуды поля. В режиме максималь-

**Таблица 3.** Параметры мощных импульсов СШП-излучения

Импульс, нс	$f_H$	$f_B$	$f_0$	$\Delta f$	$\Delta f/f_0$	$b = f_B/f_H$
	ГГц					
0.5	0.31	2.17	1.24	1.86	1.5	7
1	0.28	1.73	1	1.45	1.45	6.2
2	0.126	1.02	0.573	0.89	1.55	8.1
3	0.115	0.574	0.34	0.46	1.33	5
Суммарный, макс. амплитуда	0.102	0.907	0.5	0.805	1.6	8.9
Суммарный, макс. спектр	0.086	1.45	0.76	1.36	1.78	16.9



ной ширины спектра это отношение достигает 32. Различие между расчетными и экспериментальными значениями ширины спектра обусловлено отличием формы экспериментальных импульсов излучения от модельных.

Предложена и реализована комбинированная схема четырехканального формирователя биполярных импульсов напряжения амплитудой до  $\pm 80$  кВ и длительностью 0.5, 1, 2 и 3 нс с высокой стабильностью параметров при частоте повторения импульсов до 100 Гц.

Создан источник мощных импульсов синтезированного излучения на основе решетки  $2 \times 2$  комбинированных антенн, возбуждаемых биполярными импульсами напряжения длительностью 0.5, 1, 2 и 3 нс. Реализовано два режима синтеза излучения: максимальная напряженность поля и максимальная ширина спектра. В первом режиме получены импульсы излучения с эффективным потенциалом 290 кВ, а во втором — 185 кВ. Смену режимов осуществляли с помощью изменения времени задержки между импульсами. Отношение крайних частот спектра синтезированного импульса во втором режиме было увеличено в среднем в 2.6 раза по сравнению с импульсами, излученными комбинированными антеннами, возбуждаемыми биполярными импульсами одинаковой длительности.

Из полученных результатов численного моделирования следует, что перспективы развития данного метода синтеза импульсов излучения с расширенной полосой частот связаны с использованием многоэлементных антенных решеток.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Е.А. Севостьянова, Ю.А. Андреева и С.С. Смирнова за помощь в работе.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (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. *Andreev Yu.A., Buyanov Yu.A., Koshelev V.I. et al.* // Proc. Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 4. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999. P. 181.
3. *Chen V.C., Ling H.* Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis. Boston; London: Artech House, 2002.
4. *Андреев Ю.А., Кошелев В.И., Романченко И.В. и др.* // РЭ. 2013. Т. 58. № 8. С. 337. <https://doi.org/10.7868/S0033849413040025>
5. *Стрелков П.С., Тараканов В.П., Диас-Михайлова Д.Е. и др.* // Физика плазмы. 2019. Т. 45. № 4. С. 335. <https://doi.org/10.1134/S0367292135030093>
6. *Koshelev V.I., Plisko V.V., Sevostyanov E.A.* // J. Phys.: Conf. Series. 2017. V. 830. P. 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/830/1/012012>
7. *Кошелев В.И., Плиско В.В., Севостьянов Е.А.* // Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60. № 8. С. 98.
8. *Efremov A.M., Koshelev V.I., Plisko V.V., Sevostyanov E.A.* // Rev. Sci. Instrum. 2017. V. 88. № 9. P. 094705. <https://doi.org/10.1063/1.5003418>
9. *Ефремов А.М., Кошелев В.И., Плиско В.В., Севостьянов Е.А.* // ПТЭ. 2019. № 1. С. 36. <https://doi.org/10.1134/S003281621806006X>
10. *Koshelev V.I., Buyanov Yu.I., Andreev Yu.A. et al.* // Proc. IEEE Pulsed Power Plasma Science Conf., Las Vegas, USA, June 17–22, 2001 (IEEE Piscataway, N.J. 2001), V. 2. P. 1661.
11. *Андреев Ю.А., Буянов Ю.И., Кошелев В.И.* // РЭ. 2005. Т. 50. № 5. С. 585.
12. Federal Communication Commission USA (FCC) 02-48, ET Docket 98-153, First report and order, April 2002.
13. *Wales D.J., Doye J.P.K.* // J. Phys. Chem. 1997. V. 101. № 28. P. 5111. <https://doi.org/10.1021/jp970984n>
14. *Storn R., Price K.* // J. Global Optimization. 1997. V. 11. № 4. P. 341. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>
15. *Endres S.C., Sandrock C., Focke W.W.* // J. Global Optimization. 2018. V. 72. № 2. P. 181. <https://doi.org/10.1007/s10898-018-0645-y>
16. *Koshelev V.I., Andreev Yu.A., Efremov A.M. et al.* // J. Energy and Power Engineering. 2012. V. 5. № 5. P. 771.
17. *Андреев Ю.А., Ефремов А.М., Кошелев В.И. и др.* // ПТЭ. 2011. № 6. С. 51.
18. *Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М., Плиско В.В.* // ПТЭ. 2013. № 3. С. 61.
19. *Губанов В.П., Ефремов А.М., Кошелев В.И. и др.* // ПТЭ. 2017. № 2. С. 61.
20. *Зоркальцева М.Ю., Кошелев В.И., Петкун А.А.* // Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60. № 8. С. 26.
21. *Андреев Ю.А., Ефремов А.М., Кошелев В.И. и др.* // РЭ. 2011. Т. 56. № 12. С. 1457.
22. *Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М. и др.* // РЭ. 2007. Т. 52. № 7. С. 813.
23. *Андреев Ю.А., Кошелев В.И., Плиско В.В.* // Докл. 5-й Всерос. научно-техн. конф. “Радиолокация и радиосвязь”. М., 2011. С. 77.
24. *Andreev Yu.A., Gubanov V.P., Efremov A.M., et al.* // Laser and Particle Beams. 2003. V. 21. № 2. P. 211. <https://doi.org/10.1017/S0263034603212088>
25. *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.