

УДК 621.396.673

*Е.В. БАЛЗОВСКИЙ, Ю.И. БУЯНОВ, В.И. КОШЕЛЕВ, Э.С. НЕКРАСОВ***СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ ПРИЕМНАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА 2×2 ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ СО СПЕКТРОМ В ДИАПАЗОНЕ 0.01-2 ГГц<sup>1</sup>**

Разработана сверхширокополосная антенная решетка 2×2, элементами которой являются компактные активные дипольные антенны. В отличие от представленных ранее, новые антенны содержат встроенный симметризатор, что позволяет существенно уменьшить массогабаритные параметры антенной решетки. В результате оптимизации геометрии антенны и топологии активных элементов удалось сдвинуть нижнюю частотную границу в сторону низких частот и регистрировать наносекундные импульсы со спектром в диапазоне от 10 МГц до 2 ГГц. Описана конструкция антенной решетки, представлены результаты исследования характеристик антенн и осциллограммы зарегистрированных коротких сверхширокополосных импульсов.

*Ключевые слова:* сверхширокополосные импульсы, приемная антенна, антенная решетка.

**Введение**

Для регистрации временной формы сверхширокополосных (СШП) электромагнитных импульсов длительностью 1–4 нс с малыми искажениями необходимы приемные антенны, форма импульсов напряжения на выходе которых пропорциональна напряженности электрического поля. При объединении в антенную решетку к антенным элементам предъявляются дополнительные требования: малые электрические размеры, наличие и постоянство фазового центра, а также сохранение положения максимума диаграммы направленности антенны в диапазоне частот, занимаемых спектром регистрируемых импульсов. Наиболее полно этим требованиям соответствуют активные дипольные антенны. Для уменьшения частотной зависимости импеданса диполя предпочтительно использовать рассогласованный режим, в этом случае нагрузкой диполя является активный четырехполюсник с емкостным характером импеданса, а вносимое усиление компенсирует уменьшение чувствительности антенны [1, 2]. В работе [3] приведен вариант конструкции активной дипольной антенны, выполненной по печатной технологии, полоса пропускания которой расширена в сторону низких частот. Такая антенна позволяет регистрировать короткие СШП импульсы наносекундной длительности с малыми искажениями. Благодаря малым размерам антенны могут быть объединены в решетку, как синфазную, так и сканирующую.

При построении приемной антенной решетки с количеством элементов  $2n \times 2m$ , где  $n$  и  $m$  – натуральные числа, предлагается использовать конструкцию, основанную на антенной решетке из 2×2 диполей, размещенных в углах квадрата и образующих антенный модуль со своей диаграммообразующей схемой. В сканирующей приемной антенной решетке сложение сигналов от каждого элемента антенного модуля может быть реализовано с использованием программируемых линий задержки [4]. В дальнейшем, сложение сигналов от нескольких модулей может быть реализовано так же с заданными временными сдвигами. Однако в данной работе для отработки конструкции и измерения характеристик предложенного антенного модуля из 2×2 использовано синфазное сложение сигналов.

Сумматор сигналов с каждого антенного элемента должен быть согласован по каждому входу. Использование двоично-этажной схемы при сложении  $2n$  сигналов может быть реализовано на кольцевых сумматорах [5], которые для расширения полосы пропускания выполняются многозвенными. Однако при смещении нижней частотной границы в сторону низких частот и расширения полосы пропускания до нескольких октав применение кольцевых сумматоров затруднительно. Предлагается использовать резистивные сумматоры, которые имеют согласованные входы с самых низких частот, но вносят несколько большее ослабление сигнала. Ниже представлена конструкция четырехканального СШП резистивного сумматора, макета антенной решетки и их характеристики.

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект №16-19-10081

### Конструкция антенной решетки

Внешний вид приемной антенной решетки приведен на рис. 1. Активные диполи 1 образуют антенный модуль 2×2, фидерные линии 2 прикрыты объемным поглощающим материалом 3 для уменьшения влияния отражения от расположенной снизу металлизированной платы, на которой выполнен сумматор. Расстояние между центрами диполей 68 мм, длины кабелей каждого канала от диполей до сумматора одинаковы и равны 200 мм.

Активный диполь выполнен печатным способом на пластине стеклотекстолита размером 60×27 мм и толщиной 1 мм, состоит из секционированных плеч (1 на рис. 2), в разрыве которых установлены резисторы номиналом 200 Ом для уменьшения частотной зависимости импеданса диполя, к которым присоединен активный четырехполюсник (3) с симметричным входом и несимметричным выходом. Электрическая схема четырехполюсника аналогична приведенной в работе [3], содержит два полевых транзистора ATF38143 Avago Technologies, включенных по схеме с общим истоком с цепями смещения и частотной коррекции. В качестве симметратора использован широкополосный ферритовый трансформатор Masom ETC1-1-13 (4 на рис. 2). Каждый диполь оснащен выходным разъемом типа SMA и отдельным проводом питания (с обратной стороны на рис. 2). Напряжение питания 3 В, потребляемый ток 25 мА.

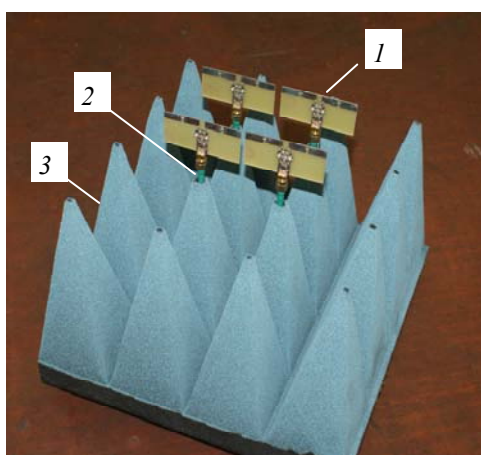


Рис. 1. Внешний вид антенной решетки.  
1 – активные диполи; 2 – фидер и линия питания;  
3 – объемный поглощающий материал

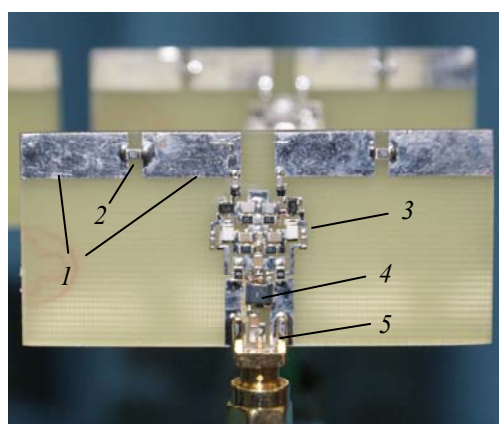


Рис. 2. Внешний вид активного диполя.  
1 – секционированное плечо диполя; 2 – резистор;  
3 – симметричный активный элемент; 4 – симметратор;  
5 – выходной разъем типа SMA

### Конструкция и характеристики сумматора

Схема резистивного сумматора приведена на рис. 3а. Сигналы со входов 1-4 складываются сначала попарно, затем еще раз и поступают на выход 5. Волноведущие линии 6 выполнены копланарными для уменьшения взаимодействия. Применены поверхностно-монтируемые резисторы 7 типа-размера 0805 номиналом 15 Ом. Сумматор выполнен печатным способом на пластине СВЧ

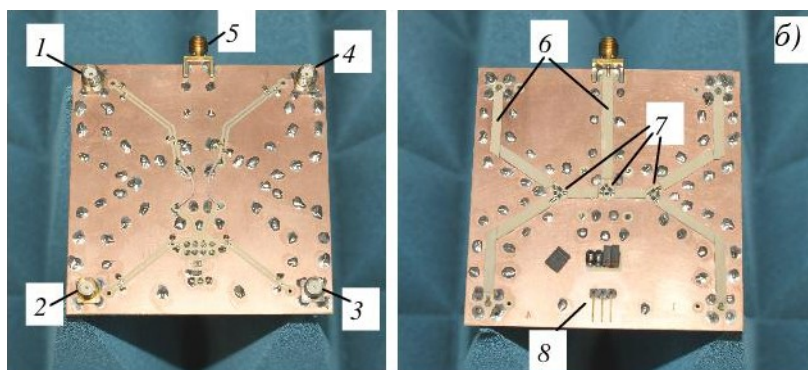
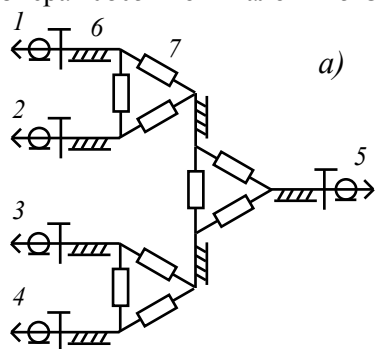


Рис. 3. Схема (а) и внешний вид (б) резистивного сумматора: 1-4 – входные разъемы; 5 – выходной разъем; 6 – копланарные линии; 7 – резисторы; 8 – разъем питания активных диполей

диэлектрика ФЛАН с относительной диэлектрической проницаемостью 5, размером пластины  $82 \times 82$  мм, толщиной 1 мм. Внешний вид сумматора приведен на рис. 3б. Напряжение питания активных диполей подается через разъем 8, переключки 9 позволяют по отдельности подключать каждый диполь к шине питания.

Измеренные частотные зависимости модуля коэффициента передачи  $|S_{51}|$ – $|S_{54}|$  со входов 1–4 сумматора (рис. 3) на выход 5 приведены на рис. 4 (кривые 1–4, соответственно). В полосе частот от 10 МГц до 4 ГГц ослабление составляет 9 дБ, перепад не превышает 1,7 дБ. В полосе частот от 10 МГц до 3 ГГц различие между каналами не превышает 0,6 дБ, в диапазоне до 2 ГГц различие между каналами не превышает 0,3 дБ. Кривые 5 и 6 на рис. 4 характеризуют развязку между входами сумматора. Коэффициент передачи  $|S_{21}|$  между входами 1 и 2 (аналогично  $|S_{43}|$  для входов 3 и 4) равен  $-4,9 \pm 1$  дБ в полосе частот до 4 ГГц (кривая 5). Коэффициенты передачи  $|S_{41}|$  между входами 1 и 4, а также  $|S_{32}|$  для входов 2 и 3 не превышают -12 дБ в полосе частот до 4 ГГц (кривая 6).

Фазочастотная характеристика сумматора при передаче со входа на выход приведена на рис. 5. В полосе от 10 МГц до 4 ГГц отклонение фазочастотной характеристики от линейной зависимости не превышает 10 градусов. Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) для всех входов приведен на рис. 6 (кривая 1). В диапазоне от 10 МГц до 4 ГГц КСВН не превышает значения 2. Кривая 2 соответствует согласованию по выходу сумматора.

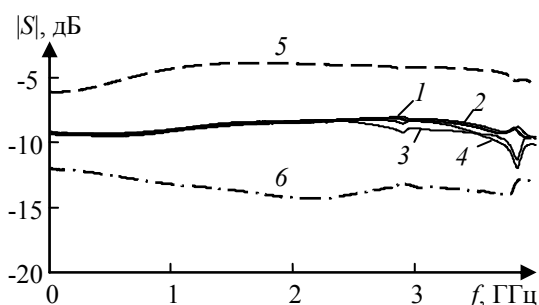


Рис. 4. Модуль коэффициента передачи со входов 1–4 на выход сумматора (кривые 1–4), со входа 1 на вход 2 (кривая 5) и со входа 1 на вход 4 (кривая 6)

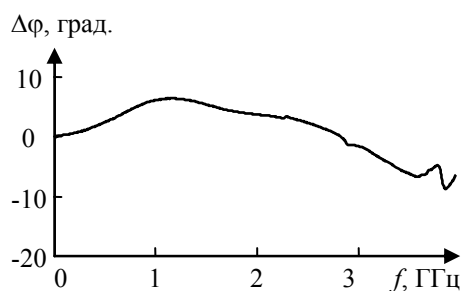


Рис. 5. Фаза коэффициента передачи со входа на выход сумматора

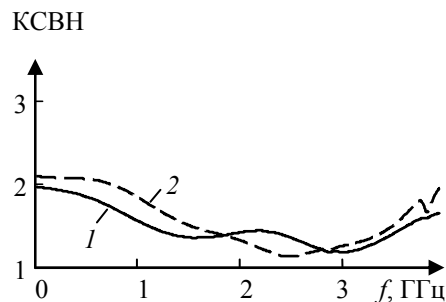


Рис. 6. КСВН сумматора по входам (кривая 1) и выходу (кривая 2)

### Характеристики антенной решетки во временной области

Измерения характеристик приемных антенн проведены во временной области с использованием набора генераторов коротких СШП импульсов и комбинированных антенн, оптимизированных для эффективного излучения импульсов с различными спектрами. При возбуждении биполярными импульсами (БИ) напряжения длительностью  $\tau_p = 0,5$  нс использовалась комбинированная антенна [6] (КА1), при возбуждении БИ с  $\tau_p = 1$  нс – антенна [7] (КА 2), при возбуждении БИ с  $\tau_p = 2$  нс – антенна [8] (КА3), при возбуждении монополярными импульсами с  $\tau_p = 3,5$  нс – антенна [9] (КА4). В качестве эталонной при измерении формы СШП импульсов использовалась ТЕМ-антенна с размерами земляной пластины  $120 \times 50$  см и высотой раскрыва 8 см. Напряжение на выходе ТЕМ-антенны пропорционально напряженности падающего поля, а действующая длина в широком диапазоне не зависит от частоты, и равна половине высоты раскрыва. Спектр (по уровню 0,1 от максимума) излученных импульсов антенной КА4 занимает полосу частот 10 МГц–1 ГГц,

антенной КА3 – 50 МГц–1,3 ГГц, антенной КА2 – 80 МГц–2,2 ГГц, антенной КА1 – 250 МГц–4,3 ГГц. На рис. 7 представлены временные формы импульсов напряжения на выходе приемной антенной решетки (кривые 1). Кривые 2 соответствуют импульсам на выходе ТЕМ-антенны.

Несмотря на небольшую развязку между входами сумматора, форма регистрируемых импульсов искажается незначительно, что может быть обусловлено высокой симметрией каналов сумматора, и тем, что активные элементы диполей являются невзаимными четырехполосниками с высоким коэффициентом усиления.

Для количественной оценки искажения временной формы импульсов, вычислялось среднеквадратическое отклонение  $\sigma$  формы импульса напряжения  $U(t)$  на выходе антенной решетки и напряжения  $V(t)$  на выходе эталонной антенны согласно выражению:  $\sigma = \sqrt{\int_T [u(t-t_0) - v(t)]^2 dt / \int_T u^2(t) dt}$ , где  $u(t) = U(t) / \sqrt{\int_T U^2(t') dt'}$  и  $v(t) = V(t) / \sqrt{\int_T V^2(t') dt'}$  – нормированные функции,  $T$  – временное окно, а  $t_0$  – временной сдвиг  $U(t)$  относительно  $V(t)$ , при котором  $\sigma$  принимает минимальное значение. При воздействии импульсами, излученными антеннами КА2–КА4,  $\sigma$  не превышает величины 0,16. При воздействии импульсами, излученными антенной КА1,  $\sigma$  не превышает величины 0,2 Действующая длина антенной решетки равна 0,3 см.

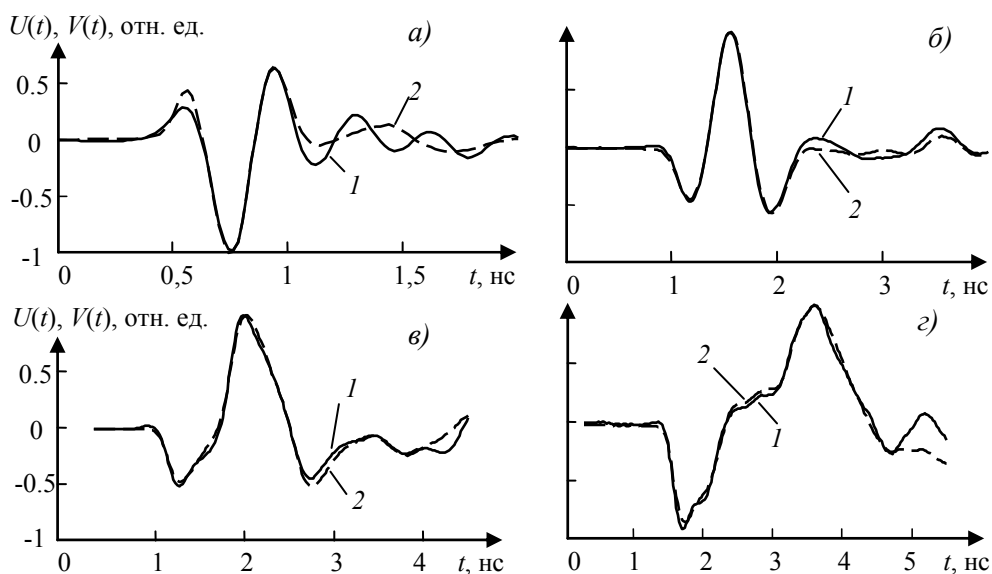


Рис. 7. Временные формы импульсов на выходе приемной антенной решетки при возбуждении передающих антенн 0,5-нс биполярными импульсами (а); 1-нс биполярными импульсами (б), 2-нс биполярными импульсами (в), 3,5-нс монополярными импульсами (г). 1 – антенная решетка; 2 – ТЕМ-антенна

### Заключение

Разработана и исследована активная дипольная приемная антенная решетка 2×2, предназначенная для регистрации СШП импульсов со спектром в диапазоне частот 0,01–2 ГГц. Проведено тестирование антенной решетки с помощью воздействия короткими СШП импульсами длительностью 1–4 нс. Временная форма импульсов напряжения на выходе разработанной антенной решетки и на выходе эталонной ТЕМ-антенны различаются не более, чем на 16% по среднеквадратическому критерию. При воздействии субнаносекундными импульсами, у которых верхняя частота в спектре превышает 4 ГГц, искажение формы импульсов не превышает 20% по сравнению с ТЕМ-антенной. Дальнейшая работа будет направлена на разработку антенной решетки с большим количеством элементов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буянов Ю. И., Смирнов В. П. Активные антенны. – Томск: изд-во Томского пед. инст. – 1976. – 90 с.
2. Балзовский Е. В., Буянов Ю. И., Кошелев В. И. // Изв. вузов. Физика. – 2007. – Т. 50. – №5. – С. 82-86
3. Балзовский Е. В., Буянов Ю. И., Кошелев В. И., Некрасов Э. С. // 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016). Севастополь, 4-

- 10 сентября 2016 г.: материалы конф. – Севастополь, 2016. – Т. 5. – С. 912-918.
4. Balzovsky E.V., Buyanov Y.I., Koshelev V.I., Nekrasov E.S. // *Rev. Sci. Instr.* – 2016. – V. 87. – No. 3. – 034703.
  5. Балзовский Е.В., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. // *РЭ.* – 2010. Т. 55. – № 2. – С. 184-192.
  6. Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М., Плиско В.В., Сухушин К.Н. // *ПТЭ.* – 2011. – № 1. – С. 77-83.
  7. Андреев Ю.А., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. // *РЭ.* – 2005. – Т. 50. – № 5. – С. 585-594.
  8. Губанов В.П., Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М., Коровин С.Д., Плиско В.В., Степченко А.С., Сухушин К.Н. // *ПТЭ.* – 2005. – № 3. – С. 46-54.
  9. Koshelev V.I., Andreev Yu.A., Efremov A.M., Kovalchuk B.M., Plisko V.V., Sukhushin K.N., and Liu S. // *J. Energy Power Eng.* – 2012. – V. 5. – No. 6. – P. 771-776.

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия  
E-mail: koshelev@lhfe.hcei.tsc.ru

Балзовский Евгений Владимирович, к.ф.-м.н., науч. сотр.;  
Буянов Юрий Иннокентьевич, к.ф.-м.н., доцент, ведущ. инженер;  
Кошелев Владимир Ильич, д.ф.-м.н., профессор, зав. лаб.;  
Некрасов Эдуард Сергеевич, инженер

*E.V. BALZOVSKY, YU.I. BUYANOV, V. I. KOSHELEV, E.S. NEKRASOV*

## ULTRAWIDEBAND RECEIVING ANTENNA ARRAY 2×2 FOR RECORDING OF PULSES WITH SPECTRUM WITHIN 0.01-2 GHz

An ultrawideband 2×2 antenna array has been developed. The antenna elements are compact active dipole antennas. In contrast with the previously presented antennas, the new ones contain a surface-mounted built-in balanced-to-unbalanced unit allowing essentially decreasing the weight and size of the antenna array. As a result of optimization of the antenna geometry and topology of active elements, we succeeded to shift the lower frequency boundary towards low frequencies and to record the nanosecond pulses with the spectrum ranging from 10 MHz to 2 GHz. The design of the antenna array is described. The results of investigations of the antenna characteristics and the waveform of the recorded ultrawideband pulses are presented.

**Keywords:** *ultrawideband pulses, receiving antenna, antenna array.*

### REFERENCES

1. Buyanov Yu.I., Smirnov V.P. *Activnie anteny*, Tomsk, Tomsk state ped. univ., 1976, 90 p. (In Russ.)
2. Balzovskii E.V., Buyanov Yu.I., and Koshelev V.I. An active antenna for measuring pulsed electric fields, *Rus. Phys. J.*, 2007, vol. 50, no 5, pp. 503 - 508.
3. Balzovsky E.V., Buyanov Y.I., Koshelev V.I., Nekrasov E.S. Ultrawideband receiving dipole antenna 0.15–2 GHz, Proceedings of the 26-th International conference “Microwave and Telecommunication Technology” (CriMiCo’2016), Sevastopol, Russia, September 4-10, 2016, P. 912 - 918.
4. Balzovsky E.V., Buyanov Y.I., Koshelev V.I., and Nekrasov E.S. Dual polarized receiving steering antenna array for measurement of ultrawideband pulse polarization structure, *Rev. Sci. Instrum.*, 2016, vol. 87, no. 3, 034703.
5. Balzovskii E.V., Buyanov Yu.I., Koshelev V.I. Dual polarization receiving antenna array for recording of ultra-wideband pulses, *J. Commun. Technol. Electron.*, 2010, vol. 55, no. 2, pp. 172 - 180.
6. Efremov A.M., Koshelev V.I., Kovalchuk B.M., Plisko V.V., and Sukhushin K.N. High-power sources of ultrawideband radiation with subnanosecond pulse length, *Instrum. Exper. Techn.*, 2011, vol. 54, no. 1, pp. 70 - 76.
7. Andreev Yu.A., Buyanov Yu.I., Koshelev V.I. A combined antenna with extended bandwidth, *J. Commun. Technol. Electron.*, 2005, vol. 50, no. 5, pp. 535 - 543.
8. Gubanov V.P., Efremov A.M., Koshelev V.I., Koval’chuk B.M., Korovin S.D., Plisko V.V., Stepchenko A.S., and Sukhushin K.N. Sources of high-power ultrawideband radiation pulses with a single antenna and a multielement array, *Instrum. Exper. Techn.*, 2005, vol. 48, no. 3, pp. 312 – 320.
9. Koshelev V.I., Andreev Yu.A., Efremov A.M., Kovalchuk B.M., Plisko V.V., Sukhushin K.N., and Liu S. Study on stability and efficiency of high-power ultrawideband radiation source, *J. Energy Power Eng.*, 2012, vol. 5, no. 6, pp. 771 - 776.

Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (IHCE SB RAS), Tomsk, Russia  
E-mail: koshelev@lhfe.hcei.tsc.ru

Balzovsky Evgeny Vladimirovich, Reseacher, PhD;  
Buyanov Yury Innokentevich, Senior Engineer, Assoc. Prof., PhD;  
Koshelev Vladimir Ilich, Head of Laboratory, Prof., Dr. Sc.  
Nekrasov Eduard Sergeevich, Engineer.