

СИНХРОНИЗИРОВАННЫЕ АКТИВНЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОХОЖДЕНИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ В АТМОСФЕРЕ И ИОНОСФЕРЕ

© 2023 г. Е. Ф. Лебедев^{1,*}, В. Е. Осташев¹, А. В. Ульянов¹,
В. М. Федоров¹, М. А. Шурупов¹

Представлено академиком РАН Е.А. Мареевым 20.12.2022 г.

Поступило 26.12.2022 г.

После доработки 17.03.2023 г.

Принято к публикации 20.03.2023 г.

Исследованы активные антенные синхронизируемые решетки, генерирующие на расстоянии несколько сотен километров сверхширокополосное излучение с напряженностью электрического поля около 1 В/м. Они предназначены для исследования прохождения сверхширокополосных сигналов в приземной слое атмосферы и сквозь ионосферу. Созданы синхронные антенные решетки из 4 и 9 излучающих модулей. Их излучение имеет симметричную по осям X и Y диаграмму направленности с длительностью импульсов на полувысоте около 100 пс. Они обладают импульсным энергопотенциалом ($E \times R$) около 60 и 150 кВ, полной массой 50 и 100 кг соответственно. Такие характеристики позволяют размещать их на воздушных носителях. Рассматриваются варианты использования подъемных шаров при излучении в приземном слое атмосферы и вариант размещения на метеорологических ракетах при излучении с высоты 300 км на Землю.

Ключевые слова: активные антенные решетки, синхронизация, сверхширокополосное излучение

DOI: 10.31857/S2686740023030112, **EDN:** OYWDHI

В последнее время все большее распространение в физике и технике получают сверхширокополосные (СШП) излучатели импульсов суб- и наносекундного диапазона длительностей с шириной частотного спектра до 10 ГГц [1–8]. Именно это свойство обеспечивает новое качество в решении задач радиочастотной локации, зондирования поверхности Земли и радиосвязи.

Перечень и краткий анализ исследований по прохождению таких импульсов в нелинейных средах проведены в [9]. Эти исследования выявили, в частности, искажения формы импульсов из-за поглощения и дисперсии при распространении в свободной атмосфере вследствие резонансного воздействия на молекулы и в загрязненной атмосфере из-за дождя и примесей, а также в ионосфере из-за взаимодействия с электронами, в том числе в замагниченной плазме. Рассмотрено также искажение формы импульсов излучения при распространении их вдоль земной поверхности, в том числе с растительным покровом. Однако экспериментальное подтверждение этих результатов

проведено в малой части публикаций, причем на примере узкополосных СВЧ-сигналов. Малое число и фрагментарность выполненных опытов с СШП-сигналами препятствуют надежному прогнозированию практических результатов в технических разработках. В теоретических работах по прохождению СШП-сигналов в ионосфере прогнозируются заметные искажения формы сигналов вследствие взаимодействия излучения с электронами и неоднородностями среды вдоль трасс длиной в десятки и сотни километров. По изложенным причинам экспериментальные исследования прохождения СШП-сигналов в атмосфере и ионосфере Земли могут способствовать получению новых фундаментальных знаний и принятию на их основе обоснованных решений по применению СШП-сигналов в перспективных технологиях.

Одним из вариантов построения СШП-излучателей для экспериментальных исследований является использование высоковольтных генераторов видеоимпульсов с крутизной фронта изменения напряжения $\approx 10^{15}$ В/с и импульсной антенны на основе ТЕМ-рупора [10]. Созданные по такой схеме компактные и автономные модули излучателей характеризуются с импульсным энергопотенциалом ($E \times R$) ≈ 20 –300 кВ при амплитуде напря-

¹ Объединенный институт высоких температур
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: lebedev@ihed.ras.ru

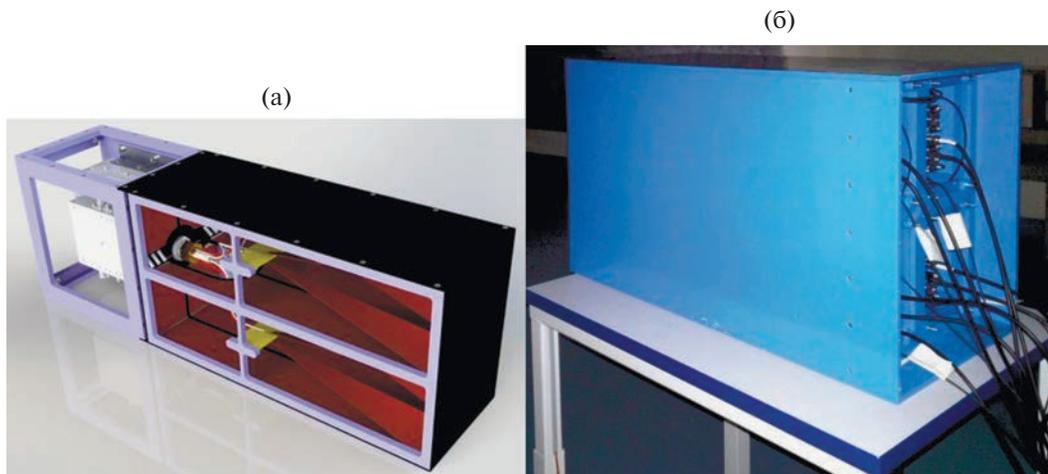


Рис. 1. Излучающий СШП-модуль синхронизированной антенной решетки (а) и синхронизированная антенная решетка из четырех (2×2) излучающих модулей (б).

жения возбуждения рупора 10–100 кВ [5–9] (E – напряженность электрического поля импульсного излучения на удалении R от антенны по ее оси). На рис. 1а приведена фотография одного модуля излучателя с антенной на основе пассивной антенной решетки из 4 ТЕМ-рупоров. Такие модули могут быть объединены в антенные решетки с электронным управлением направления излучения при условии соответствующей синхронизации импульсов возбуждения их антенн. На рис. 1б показана синхронизируемая активная антенная решетка (СААР) из 2×2 таких излучающих модулей, подходящая для применения в экспериментальных исследованиях в атмосфере [10] на больших дистанциях и для подготовки экспериментов в ионосфере.

1. СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ СААР ИЗ 2×2 И 3×3 ЭЛЕМЕНТОВ

Система синхронизации производит коррекцию по времени поступления сигналов управления на подачу высоковольтных импульсов возбуждения каждого излучающего модуля. Она включает в себя входной канал, последовательно соединенные детектор фронта импульса с двумя входами, фильтр, блок изменяемой задержки, а также канал обратной связи от генератора к одному из входов детектора фронта импульсов. Входной канал принимает входную последовательность импульсов и передает ее в устройство обработки входного сигнала и выработки сигнала обратной связи, соединенное с первым входным устройством (для обеспечения фиксированной временной задержки при передаче последовательности импульсов). Как указывалось выше, система включает детектор фронта импульса, имеющий первый и второй входные каналы для

приема сигнала с выхода первого устройства для обеспечения фиксированной временной задержки. Это устройство генерирует выходной сигнал, соответствующий временному интервалу между фронтами импульса на первом входном канале и фронтами импульса другого входного сигнала на втором входном канале. Далее управляющий сигнал поступает в устройство обратной связи для генерации сигнала обратной связи выходного напряжения из детектора фронта импульса для управления временной задержкой выходного сигнала.

Электронный блок системы синхронизации массой 2 кг показан на рис. 2.

На рис. 3, 4 приведены в одном масштабе осциллограммы импульса излучения одного модуля и СААР из 4 модулей. Длительность фронтального фрагмента импульсов на уровне в половину его амплитуды составляет в обоих случаях около 100 пс. Импульсный энергопотенциал синхронизированной сборки из 4 модулей равен 57 кВ (у одиночных модулей – 16 кВ).

2. ОЦЕНКИ ДАЛЬНОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

Из опытов, проведенных при изучении прохождения СШП-импульсов в приземном слое атмосферы на дистанциях до 15 км [10], следует, что удовлетворительное соотношение сигнал/шум канала регистрации напряженности импульсного поля излучения с СШП-антенной и осциллографом с рабочей полосой частот 16 ГГц обеспечивается до уровня 1 В/м. Если принять этот уровень как предельный, то СААР из 4 модулей с общим потенциалом ≈ 60 кВ позволит провести регистрацию на дистанции до 60 км, а СААР из 9 модулей –



Рис. 2. Электронный блок системы синхронизации СААР из 2×2 и 3×3 элементов.

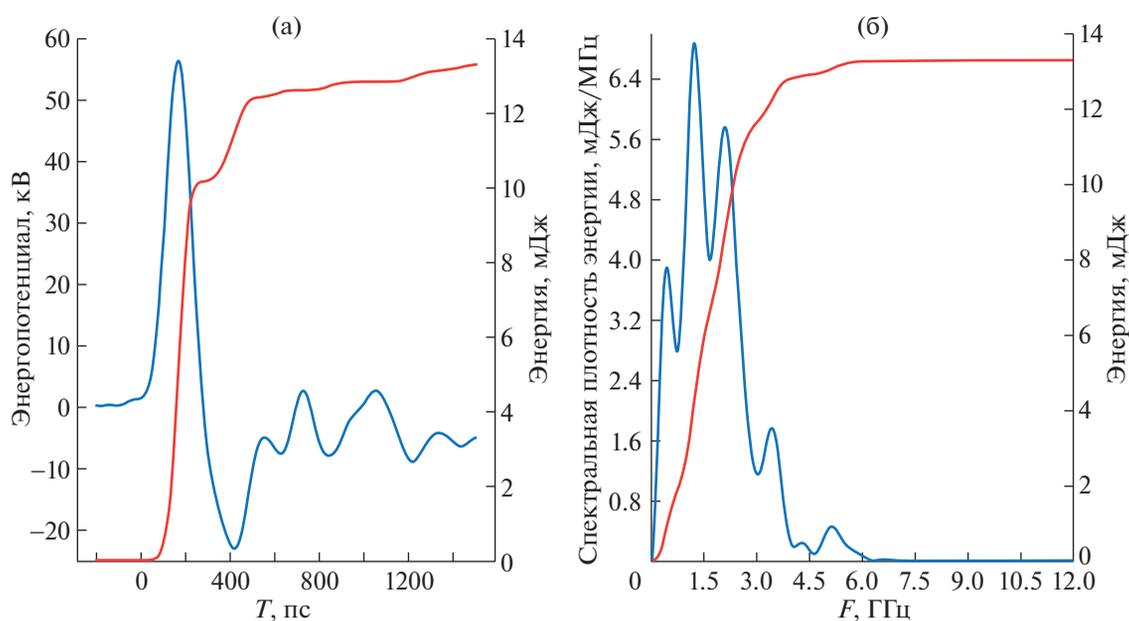


Рис. 3. Импульс излучения СААР 2×2 : осциллограмма импульса излучения (а); спектральная плотность энергии (б).

примерно до 140 км. Линейные размеры этой сборки $\approx 0.8 \times 0.8 \times 0.8$ м, масса ≈ 100 кг, средняя потребляемая мощность ≈ 2 кВт.

3. ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА В АТМОСФЕРЕ НА ДИСТАНЦИИ ДО 50 КМ

Как указывалось выше, масса излучателя из 4 модулей составляет ≈ 50 кг, автономный источник электропитания переменного тока с напряжением 220 В также имеет массу 50 кг. Массогабаритные характеристики автономной СААР таковы, что для подъема на высоту 1000 м может быть использован воздушный шар, назовем его № 1. Подъем на такую высоту исключает влияние отраженного от земной поверхности паразитного сигнала. Канал регистрации поля СШП-излучателя, приемная СШП-антенна и цифровой осциллограф размещаются на шаре № 2. Начальное расстояние между площадками старта шаров № 1 и № 2 должно составлять 20 км.

Алгоритм проведения измерений следующий. Шары стартуют одновременно и удаляются от места старта со скоростью ветра (для оценок примем скорость 10 км/ч). Шары набирают высоту 1000 м за 30 мин. Дистанция между ними сохраняется. По окончании набора высоты производится первая серия регистраций СШП-сигнала, после этого шар № 2 производит посадку, чтобы повторно подняться в воздух при увеличении дистанции между шарами до 25 км. Затем он стартует и после 30 мин подъема, когда дистанция между шарами достигает 30 км, производится очередная фиксация импульсов СШП-излучения и повторная посадка шара № 2. Полеты и измерения продолжаются такими циклами, и через два часа полета шара № 1, на исчерпание запаса топлива, производится последнее измерение.

Основной методической проблемой постановки измерений является обеспечение точности совмещения осей диаграмм направленности

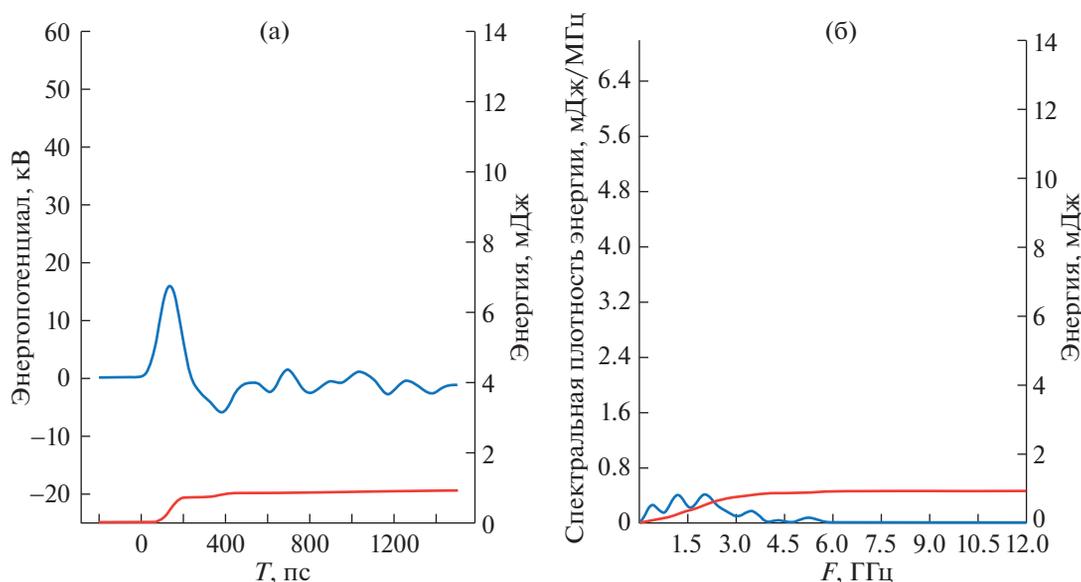


Рис. 4. Импульс излучения одиночного излучающего модуля: осциллограмма импульса излучения (а); спектральная плотность энергии (б).

(ДН) приемной и излучающей антенн при отсутствии визуального контакта между шарами на больших дистанциях. Эта задача может быть решена при использовании GPS-трекеров и компасов на каждом шаре, а также при наличии канала радиочастотной связи между шарами. Методическая ошибка, обусловленная точностью совмещения осей ДН антенн, должна решаться с учетом угловой ширины ДН и изменения амплитудно-временной формы импульса излучения при отклонении от оси ДН антенны излучателя.

4. ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА В ИОНОСФЕРЕ

В эксперименте может быть использована СААР 2×2 , размеры поперечного сечения которой (0.31×0.43 м) и масса примерно 60 кг с автономным источником питания на основе аккумуляторной батареи на 20 мин спуска позволяют использовать метеорологическую ракету МН-300. СШП-излучатель размещается в головной части ракеты, которая отстреливается по достижении верхней точки полета и спускается по баллистической траектории с ориентацией антенной на Землю. В расчетном районе полигона устанавливаются три диагностических поста. Пятно диаграммы направленности СААР 2×2 в угле 1 градус с максимальной амплитудой импульсного электрического поля меняется в процессе спуска с диаметра 3 км на высоте 300 км до 100 м при входе в атмосферу, поэтому успех эксперимента во многом зависит от отклонения траекторных параметров ракеты и точности расчета координат измерительных постов. При подготовке экспериментов значитель-

ную помощь окажет практический опыт работ в ионосфере Института динамики геосфер РАН и НПО “Тайфун” Росгидромета РФ по применению ракет МР-12 и МН-300 комплекса МР-30.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная синхронизированная антенная решетка из 4 модулей может быть использована для проведения экспериментов по изучению прохождения СШП-сигналов в атмосфере на дистанциях до 50 км.

Эта же сборка может служить основой для проведения проектных работ по подготовке эксперимента с последовательным прохождением источником СШП-излучения всех слоев ионосферы с высоты полета ракеты МН-300 до границы атмосферы и далее до уровня Земли. Такой эксперимент с достоверной регистрацией СШП-сигналов даст новую информацию, имеющую значение для уточнения фундаментальных представлений о распространении в ионосфере сверхвысокочастотных сверхширокополосных излучений.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ № 075-15-2020-790.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yalandin M.I., Luybutin S.K., Rukin S.N. et al.* Formation of nano- and subnanosecond width high-PRF powerful voltage pulses by using a hybrid modulator

- schemes // Proc. of 13th Intern. Symp. on High Current Electronics. Tomsk, Russia. 25–29 July 2004. P. 153.
2. *Koshelev V.I., Gubanov V.P., Efremov A.M. et al.* High-Power ultrawideband radiation source with multielement array antenna // Proc. of 13th Intern. Symp. on High Current Electronics. Tomsk, Russia. 25–29 July 2004. P. 258.
 3. *Efanov V.M.* Gigawatt all solid state nano- and picosecond pulse generators for radar applications // Proc. on 14th IEEE Int. Pulsed Power Conf. Dallas. TX. June 2003. P. 100.
 4. *Prather W.D., Baum C.E., Torres R.J. et al.* Survey of worldwide high-power wideband capabilities // IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility. V. 46. № 3. August 2004. P. 335–344.
 5. *Mesyats G.A., Rukin S.N., Shpak V.G., Yalandin M.I.* Generation of high-power sub-nanosecond pulses // Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 4 / Ed. by E. Heyman, B. Mandelbaum, and J Shiloh. N.Y.: Plenum, 1999.
 6. *Efanov V.M., Fedorov V.M., Grekhov I.V. et al.* Multiunit UWB Radiator of Electro-Magnetic Waves with Controlled Directional Pattern // Proc. of 13th Intern. Symp. on High Current Electronics. Tomsk, Russia. 25–29 July 2004. P. 262.
 7. *Сахаров К.Ю.* Излучатели сверхкоротких электромагнитных импульсов и методы измерений их параметров. М.: МИЭМ, 2006. 159 с.
 8. *Fedorov V.M., Efanov M.V., Ostashev V.Ye. et al.* Antenna Array with TEM-Horn for Radiation of High-Power Ultra Short Electromagnetic Pulses // Electronics. 2021. **10** (9), 1011. <https://doi.org/10.3390/electronics10091011>
 9. *Ефанов М.В., Лебедев Е.Ф., Ульянов А.В. и др.* Излучательно-измерительный комплекс для исследования прохождения сверхширокополосных сигналов в атмосфере и ионосфере земли // Теплофиз. выс. темп. 2021. Т. 59. № 6. С. 877–884. <https://doi.org/10.31857/S0040364421060028>
 10. *Гарнов С.В., Селемир В.Д., Букин В.В., Долматов Т.В., Горбенко Д.А., Жданов В.С., Ефанов М.В., Лебедев Е.Ф., Остаев В.Е., Семенов В.А., Ульянов А.В., Федоров В.М., Шурупов М.А.* Прямой эксперимент по прохождению сверхширокополосных импульсов субнаносекундной длительности в атмосфере Земли // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2023. Т. 509. С. 9–14.

SYNCHRONIZED ACTIVE ANTENNA ARRAYS FOR STUDYING THE PASSAGE OF ULTRA-WIDEBAND SIGNALS IN THE ATMOSPHERE AND IONOSPHERE

E. F. Lebedev^a, V. E. Ostashev^a, A. V. Ulyanov^a, V. M. Fedorov^a, and M. A. Shurupov^a

^a *Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Presented by Academician of the RAS E.A. Mareev

Active synchronized antenna arrays generating ultra-wideband radiation with an electric field strength of about 1 V/m at a distance of several hundred kilometers have been studied. They are designed to study the passage of ultra-wideband signals in the surface layer of the atmosphere and through ionosphere. Synchronous antenna arrays with 4 and 9 radiating modules have been created. Their radiation has a symmetrical radiation pattern along the X and Y axes with a pulse duration at half-height of about 100 ps. They have a pulse energy potential ($E \times R$) of about 60 and 150 kV, with a gross weight of 50 and 100 kg, respectively. Such characteristics allow these arrays to be placed on air carriers. The option of using air balloons when radiating in the surface layer of the atmosphere and the option of the meteorological rockets placing when radiating from a height of 300 km to the Earth surface is considered.

Keywords: active antenna arrays, synchronization, ultra-wideband radiation