

УДК 621.373

Ш. Лю, Ю.А. Андреев, В.П. Беличенко

## О двух центрах излучения в комбинированной сверхширокополосной антенне

Приведено объяснение существования двух центров излучения комбинированной антенны в режиме ее возбуждения биполярными импульсами напряжения наносекундной длительности. Показано, что существование разнесенных в пространстве центров излучения комбинированной антенны связано, в основном, с геометрией ТЕМ-рупора, используемого в антенне в качестве излучателя электрического типа.

**Ключевые слова:** комбинированная антенна, сверхширокополосная антенна, фазовый центр, центр излучения.  
**DOI:** 10.21293/1818-0442-2025-28-1-33-38

Для излучения мощных сверхширокополосных (СШП) электромагнитных импульсов используют, в основном, три типа передающих СШП-антенн: ТЕМ-антенны [1], рефлекторные антенны, возбуждаемые в том числе ТЕМ-антеннами [1, 2], и различные варианты комбинированных антенн [3]. Комбинированные антенны (КА) Буянова (г. Томск, ТГУ) изначально представляли собой компактную комбинацию излучателей электрического типа в виде электрического монополя (несимметричного электрического вибратора) и магнитного типа в виде проводящего витка с последовательно включенной емкостью. При этом возбуждение излучателей электрического и магнитного типа происходило с определенными соотношениями амплитуд и фаз протекающих в них токов [4].

Во второй половине 90-х годов прошлого века Ю. Буянов предложил идею КА, где в качестве излучателя электрического типа использовался ТЕМ-рупор [5]. Данная антенна представляет собой компактную комбинацию излучателей электрического типа (ТЕМ-рупор) и магнитного типа (один активный магнитный диполь и два пассивных). Говоря дальше о комбинированной антенне, мы будем иметь в виду именно эту конструкцию (рис. 1).

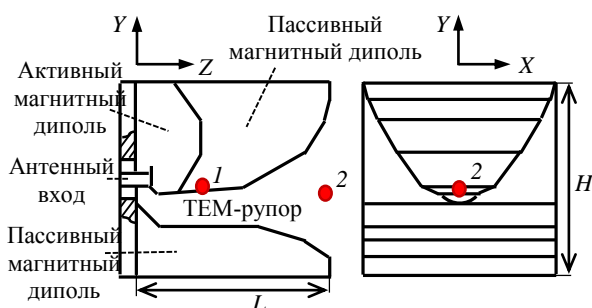


Рис. 1. Геометрия комбинированной антенны и положение: 1 – первого ЦИ, 2 – второго ЦИ

На рис. 1 также приведена система координат, центр которой совпадает с осью антенного входа ( $x = 0$ ,  $y = 0$ ), а  $z = 0$  на задней стенке антенны. КА были оптимизированы для возбуждения биполярными импульсами напряжения. Были созданы мощные источники СШП-излучения как с одиночными КА, так и с антенными решетками на основе КА. В этих источниках использовались генераторы с биполярными

импульсами напряжения длительностью 3–0,2 нс и частотой следования импульсов до 100 Гц. Характеристики одиночной КА и мощных источников СШП-излучения с одиночной КА были подробно исследованы в [3, 6].

Подробные исследования решеток КА и мощных источников СШП-излучения с излучателем в виде решетки КА приведены в [7, 8]. Работы по созданию СШП-комбинированных антенн и мощных источников СШП-излучения, в которых они используются в качестве излучателей обобщены в [9].

В настоящее время КА Буянова и близкие к ним конструкции являются наиболее распространенными мощными СШП антеннами в мире. Исследования данных антенн проводятся в Китае [10], Иране [11], Франции [12], Южной Корее [13], США [14] и других странах.

Важной характеристикой антенны является положение ее фазового центра. В случае СШП-импульсных антенн используется термин «центр излучения» (ЦИ), который является аналогом фазового центра. Если СШП-антенна имеет локальный единственный ЦИ, то это точка, при вращении антенны относительно которой импульс, принятый в дальней зоне, окажется на поверхности сферы фиксированного радиуса. Известно, что единого фазового центра для узкополосной реальной антенны при всех возможных  $\varphi$  и  $\delta$  ( $\varphi$  – азимутальный угол, а  $\delta$  – угол места) не существует.

В равной мере это справедливо и в отношении ЦИ реальной СШП-антенны. В этом случае можно попытаться найти часть сферической поверхности одновременного прихода излученных СШП-импульсов в наиболее широком диапазоне углов и соответствующую ему точку – частичный ЦИ (в дальнейшем просто ЦИ). Максимальный интерес представляет нахождение ЦИ для главного лепестка ДН.

Цели данной работы: установление пространственного положения ЦИ КА с использованием нескольких методик и доказательство факта несовпадения ЦИ, отвечающих полям КА в  $E$ - и  $H$ -плоскостях.

### Исследование положения центра излучения комбинированной антенны

Положение ЦИ может иметь важное значение в случае исследования ширины ДН антенны в случае,

когда исследуемая антенна является излучателем, установленным в фокусе зеркальной антенны, а также если она используется в системах позиционирования. Кроме того, положение центра излучения позволяет точно определить эффективный потенциал  $rE_p$  источника СШП-излучения, когда он определяется в безэховой камере с ограниченным расстоянием  $r$  от передающей антенны до приемной ( $E_p$  – пиковое значение напряженности электрического поля в точке приема). Эффективный потенциал источника СШП является важным параметром в мощных источниках и позволяет оценивать  $E_p$ , создаваемую источником на различных расстояниях от излучателя.

В [9] утверждается, что ЦИ комбинированной антенны расположен в ее геометрическом центре. Вероятно, данное утверждение базируется на исследовании [15], где была предпринята попытка измерить положение ЦИ комбинированной антенны в эксперименте. Приемная антенна перемещалась по дуге большого радиуса, регистрируя излученные комбинированной антенной импульсы с различных углов наблюдения. Измерения не дали однозначного значения для положения ЦИ, но было постулировано, что он находится в геометрическом центре антенны.

В [16] была предложена оригинальная методика нахождения положения ЦИ спиральных СШП-антенн. ЦИ находится для фиксированного направления, исходя из анализа зависимости  $rE_p(r)$  от  $r$ . В дальней зоне амплитуда импульса убывает пропорционально  $1/r$ . Следовательно, границей дальней зоны поля будет такое расстояние от центра излучения  $r_0$ , начиная с которого произведение  $rE_p$  будет постоянной величиной. Однократно измерив зависимость  $E_p(r)$ , можно построить различные зависимости  $rE_p(r)$ , отличающиеся началом отсчета  $r$ . При этом зависимости  $rE_p(r)$  асимптотически приближаются к постоянному значению с увеличением  $r$ . Было показано, что под ЦИ антенны следует понимать такую внутреннюю точку на ее оси  $r$ , что, взяв ее за точку отсчета  $r = 0$ , получается минимальное расстояние  $r_0$  до границы дальней зоны излучения, где  $r_0E_p \approx rE_p(r) \approx \text{const}$ , для  $r \geq r_0$ . Другими словами, граница дальней зоны излучения отстоит на минимальном расстоянии от ЦИ.

Данная методика, наряду с очевидным достоинством, обладает рядом недостатков:

- Достаточно трудоемка и требует высокой точности поступательного перемещения антенн (приемной или передающей) строго вдоль выбранного направления.

- Накладывает строгие ограничения на приемную антенну. Так как требуется находить значения  $E_p$  в точках вдоль прямой (от ближней до дальней зоны излучения), то для измерений нужен точечный датчик поля или антенна с минимальной эффективной поверхностью (длиной). Данное требование аналогично выполнению условия постоянства телесного угла, под которым видна приемная антенна в ходе исследования. Точно выполнить данное условие возможно только в численном эксперименте.

- Позволяет найти ЦИ, если заранее известна ось, на которой он расположен, если таких данных нет, можно получить недостоверный результат.

Возможно ли применять данную методику нахождения ЦИ для комбинированных антенн? В [17] авторы применяют описанную выше методику для определения положения ЦИ комбинированных антенн и в расчете находят зависимость  $E_p(r)$  вдоль выбранного направления. За выбранное направление берется направление оси симметрии антенны. Но комбинированные антенны (за редким исключением [14]) несимметричны. Такой подход может привести к ошибочным результатам, не говоря уже о сомнительном физическом смысле ЦИ антенны, найденного только для фиксированного направления. Кроме того, если на выбранной в исследовании прямой находится больше одного ЦИ, методика не позволит их различить и выдаст усредненное значение по координатам этих ЦИ.

В [18] была предложена методика нахождения ЦИ КА в режиме излучения наносекундных импульсов как в численном, так и в физическом эксперименте. ЦИ КА находились в двух перпендикулярных плоскостях: горизонтальной ( $H$ -плоскость) и вертикальной ( $E$ -плоскость). Вращение антенны в этих плоскостях относительно произвольных осей (ось параллельна оси  $Y$  для  $H$ -плоскости и оси  $X$  для  $E$ -плоскости, см. рис. 1) приводит к задержкам (опережениям) импульсов, регистрируемых приемной антенной для различных углов вращения по отношению к направлению  $\varphi$ ,  $\delta = 0^\circ$  (совпадает с направлением оси  $Z$ , см. рис. 1). Цель измерений – обнаружение осей вращения, обеспечивающих минимальные задержки (опережения) регистрации излученных импульсов для максимально широких диапазонов углов наблюдения. В численном эксперименте были определены все три координаты ЦИ в  $E$ - и  $H$ -плоскостях.

В качестве объекта исследования была выбрана КА с размерами: длина  $L = 16$  см, высота  $H = 15$  см и ширина  $W = 15$  см (см. рис. 1). В ходе экспериментов КА возбуждалась биполярными импульсами длительностью 1 нс и пиковыми значениями напряжения  $-21/20$  В. При этом излученный импульс имел три временных лепестка (рис. 2).

В качестве временной точки отсчета (точки регистрации импульса) была выбрана точка, соответствующая максимуму амплитуды поля,  $-E_p$ . Данный выбор был связан с тем, что второй временной лепесток меньше других подвергнут искажениям формы и выбор времени регистрации прихода импульса является однозначным (рис. 2). Для регистрации излученных импульсов использовалась приемная антенна в виде половины ТЕМ-рупора. В исследованиях регистрировалась только  $E_\theta$  компонента электрического поля, где  $\theta$  – зенитный угол ( $\theta = 90^\circ - \delta$ ). Уровень кросс-поляризованного излучения ( $E_\varphi$ ) незначителен и не рассматривался в работе. Расчеты проводились с использованием кода, разработанного в ИПЭ РАН (г. Москва) и основанного на методе FDTD. В расчетах модельную антенну возбуждали биполярным

импульсом напряжения, соответствующим по форме экспериментальному.

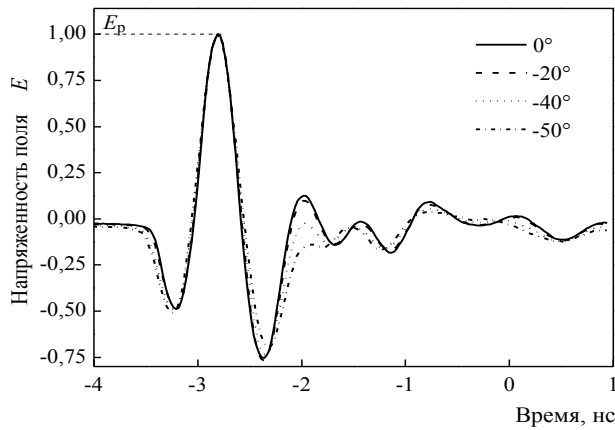
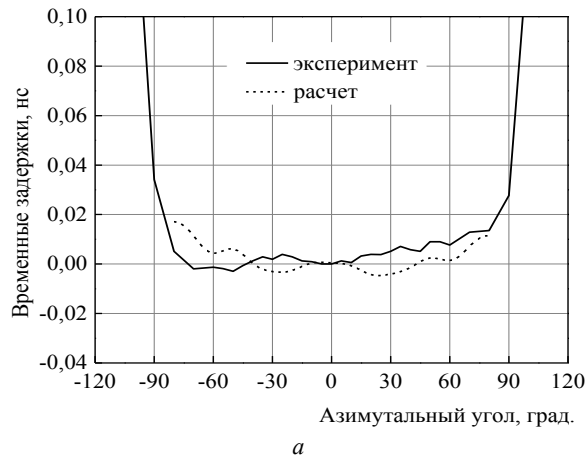
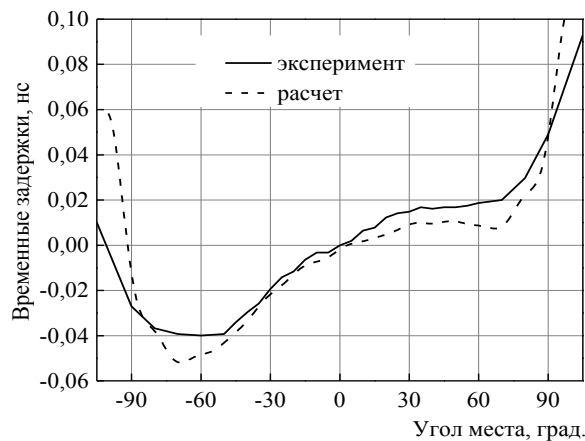


Рис. 2. Нормированные осциллограммы излученных КА в  $H$ -плоскости импульсов для различных азимутальных углов

На рис. 3, *a* представлены экспериментальные и расчетные задержки  $\Delta t$  регистрации излученного КА импульса в  $H$ -плоскости.



*a*



*b*

Рис. 3. Временные задержки регистрации излученных КА импульсов: *a* – в  $H$ -плоскости; *b* – в  $E$ -плоскости

Ось вращения в эксперименте соответствовала координате  $x = 0$  см (была выбрана из соображений зеркальной симметрии КА), значение  $z = 6$  см.

$Y$ -координата ЦИ в  $H$ -плоскости определялась в численном эксперименте и получилась равной  $-0,5$  см.

На рис. 3, *b* представлены экспериментальные и расчетные задержки  $\Delta t$  регистрации излученного КА импульса в  $E$ -плоскости. Ось вращения в эксперименте соответствовала координате  $y = 0$  см (была выбрана произвольно, как половина высоты КА), значение  $z = 16$  см. Уточненное значение  $y$ -координаты ЦИ для  $E$ -плоскости, полученное расчетным путем и подтвержденное экспериментально, составило  $-1$  см. Из приведенных графиков следует наличие двух разделенных в пространстве ЦИ КА для  $H$ -плоскости и  $E$ -плоскости (на рис. 1 показаны точками).

Аналогичные результаты (расчетные) для КА с размерами  $L = 45$  см, высота  $H = 45$  см и  $W = 47,6$  см были получены в [19]. Однако оставался открытым вопрос – в чем причина существования двух ЦИ для КА.

### Два центра излучения КА

Можно предположить, что два ЦИ появляются в КА из-за разделения в пространстве излучателей электрического и магнитного типа. Здесь можно найти аналогию с турникетной антенной и предположить, что излучение в направлении  $\varphi, \delta = 0^\circ$  эллиптически поляризовано. Однако КА является аналогом скрещенных магнитного и электрического диполей, а не двух электрических диполей, как в турникетной антенне. К тому же в [20] показано, что излучение КА в направлении  $\varphi, \delta = 0^\circ$  вертикально поляризовано.

Укажем еще на то обстоятельство, что в рупорных антеннах с углом раскрытия больше  $10^\circ$  также наблюдается [21] пространственное разделение фазовых центров (аналогично наблюдаемому в КА разделению ЦИ). При этом в конструкциях подобных антенн отсутствуют аналоги пространственно разнесенных электрического и магнитного диполей. Для объяснения пространственного разделения ЦИ КА были проведены численные эксперименты в среде CST Studio Suite. Модель КА, использовавшаяся в расчетах, имела размеры, равные размерам реальной антенны. На вход модели КА подавался биполярный импульс напряжения длительностью 1 нс.

На рис. 4 представлена структура поля  $E$  в коаксиальном фидере, в объеме антенны и вблизи КА. Структура поля рассматривается в плоскости  $XZ$  ( $H$ -плоскости), координата  $y = 0$ . Рисунок 4 примерно соответствует моменту времени, когда первый временной лепесток (см. рис. 2) уже излучился, а второй еще находится в области апертуры КА. Хорошо видно дугу окружности (отсутствие поля), соответствующую области перехода через ноль между первым и вторым временными лепестками. Центр данной окружности лежит за серединой КА ближе к ее задней стенке. Это объясняется тем, что ТЕМ-рупор не имеет боковых стенок и излучение свободно распространяется в  $H$ -плоскости от вершины рупора в широком диапазоне углов.

Однако влияние магнитного диполя, вероятно, также имеет место. Возможно, с этим связано то, что ЦИ в  $H$ -плоскости не находится вблизи вершины

(апекса) ТЕМ-рупора, а сдвинут вверх к магнитному диполю (см. рис. 1, ЦИ номер 1).

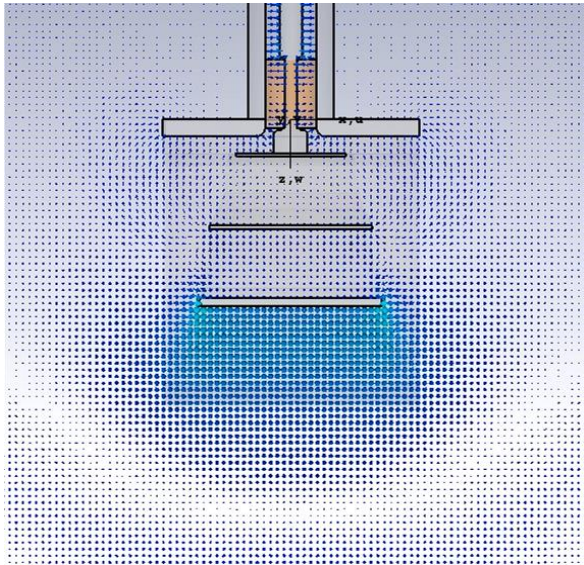


Рис. 4. Структура импульсного поля  $E$ , излучаемого КА в  $H$ -плоскости

Аналогичные расчеты были выполнены в  $E$ -плоскости для того же момента времени (рис. 5).

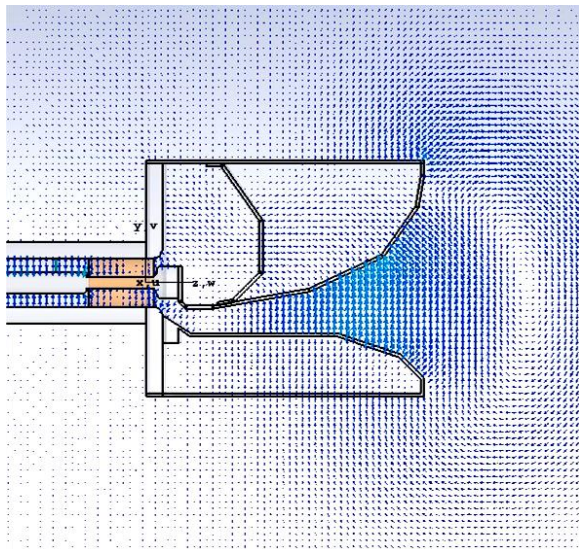


Рис. 5. Структура импульсного поля  $E$ , излучаемого КА в  $E$ -плоскости

Хорошо видно, что из-за несимметрии ТЕМ-рупора поле быстрее достигает нижней части рупора. Это совпадает с результатами, представленными на рис. 4, где видно, что импульс, излученный в направлении отрицательных  $\delta$ , регистрируется с опережением. Кроме того, из рис. 5 видно, что радиус кривизны поля на выходе апертуры КА существенно меньше аналогичного для  $H$ -плоскости. Импульсное поле достигает апертуры КА и дальше уже локальная область вблизи апертуры (см. рис. 1, ЦИ номер 2) с координатой по  $x = 0$ ,  $y = -1$ ,  $z = 16$  см является источником сферической волны, которую мы наблюдаем (см. рис. 5). Здесь проявляется принцип Гюйгенса–Френеля.

## Заключение

В данной работе представлена методика определения положения ЦИ сверхширокополосных антенн в режиме излучения импульсов наносекундной длительности. Показаны преимущества методики нахождения ЦИ КА посредством определения задержек регистрации излученных СШП-импульсов на дугах окружностей в  $E$ - и  $H$ -плоскости. Предложенный метод актуален для измерения положения ЦИ СШП-антенн в ограниченной области пространства (безэховой камере). Объяснено разделение ЦИ КА в пространстве для  $E$ - и  $H$ -плоскостей.

## Литература

1. Ultra-Wideband Source and Antenna Research / W.D. Prather, C.E. Baum, J.M. Lehr, J.P. O'Loughlin, S. Tyo, J.S. Schoenberg, R.J. Torres, T.C. Tran, D.W. Scholfield, J. Gaudet, and J.W. Burger // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2000. – Vol. 28, No. 5. – P. 117–130.
2. Integrated-Antenna-Source of Directive Peak Electric-Field Patterns for High-Power Ultrawideband Parabolic Reflector System / J. Ryu, K. Kim, T.H. Lim, H.O. Kwon, J.H. Kuk, J.S. Choi, S.H. Baek, J.W. Yu // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2019. – Vol. 18, no. 4. – P. 727–731.
3. Комбинированная антенна с расширенной полосой пропускания / Ю.А. Андреев, Ю.И. Буянов, В.И. Кошелев // Радиотехника и электроника. – 2005. – Т. 50, № 5. – С. 585–594.
4. Элемент сканирующей антенной решетки для излучения мощных электромагнитных импульсов / Ю.А. Андреев, Ю.И. Буянов, В.И. Кошелев, К.Н. Сухущин // Радиотехника и электроника. – 1999. – Т. 44, № 5. – С. 531–537.
5. Ultrawideband radiation of high-power pulses / V.I. Koshelev, Yu.I. Buyanov, Yu.A. Andreev, V.V. Plisko, and K.N. Sukhushin // Proc. IEEE Pulsed Power Plasma Sci. Conf. – 2001. – Vol. 2. – P. 1661–1664.
6. High-power ultrawideband radiation source / Yu.A. Andreev, V.P. Gubanov, A.M. Efremov et al. // Laser and particle beams. – 2003. – Vol. 21. – P. 211–217.
7. Кошелев В.И. Структура решеток сверхширокополосных комбинированных антенн / В.И. Кошелев, В.В. Плиско // Радиотехника и электроника. – 2017. – Т. 62, № 6. – С. 541–545.
8. Источник мощных импульсов сверхширокополосного излучения с 9-элементной решеткой комбинированных антенн / В.П. Губанов, А.М. Ефремов, В.И. Кошелев, Б.М. Ковальчук, В.В. Плиско, В.В. Ростов, А.С. Степченко // Приборы и техника эксперимента. – 2017. – № 2. – С. 61–67.
9. Беличенко В.П. Сверхширокополосные импульсные радиосистемы / В.П. Беличенко, Ю.И. Буянов, В.И. Кошелев. – Новосибирск: Наука, 2015. – 588 с.
10. Design and optimization of high-power UWB combined antenna based on Klopfenstein impedance taper / Shao-fei Wang and Yan-zhao Xie // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2017. – Vol. 65, No. 12. – P. 6960–6967.
11. Design and Fabrication of a Novel Ultrawideband Combined Antenna / Mehrdadian Ali and Keyvan Forooghi // IEEE Antennas and wireless propagation letters. – 2014. – Vol. 13. – P. 95–98.
12. Optoelectronic generation of transient waveforms for UWB radars with rejected frequencies / J. Hyvernaud, G. Reineix, R. Negrier, J. Andrieu, M. Lalande and V. Couderc // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. – 2020. – No. 12. – P. 543–550.
13. A Directive Subminiature Antenna for High-Power Ultrawideband Pulse Radiation / J.S. Kim, Y.-J. Yoon,

H.-O. Kwon, J. Ryu, J.S. Choi // *IEEE Antennas and wireless propagation letters*. – 2014. – Vol. 13. – P. 1565–1568.

14. TEM horn inspired wideband antennas for diverse applications / M.A. Elmansouri, D.S. Filipovic // 2019 IEEE-APS Topical conference on Antennas and Propagation in wireless communications (APWC), 2019. – P. 016–019.

15. Сверхширокополосное зондирование объектов за радиопрозрачными препятствиями / Е.В. Балзовский, В.И. Кошелев, С.Э. Шпилов // *Изв. вузов. Физика*. – 2010. – Т. 53, № 9-2. – С. 83–87.

16. A source of high-power pulses of elliptically polarized ultrawideband radiation / Yu.A. Andreev, A.M. Efremov, V.I. Koshelev, B.M. Kovalchuk, A.A. Petkun, K.N. Sukhushin, M.Yu. Zorkaltseva // *Review of Scientific Instruments*. – 2014. – Vol. 85. – P. 104703 (8).

17. Численное моделирование сверхширокополосных комбинированных антенн / М.Ю. Зоркальцева, В.И. Кошелев, А.А. Петкун // *Изв. вузов. Физика*. – 2017. – Т. 60, № 8. – С. 26–30.

18. Method for radiation center position measurements of a combined antenna in the pulsed mode / Yu.A. Andreev, V.N. Kornienko, S. Liu // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2018. – Vol. 66, no. 8. – P. 4269–4276.

19. Фазовый центр и центр излучения комбинированных антенн, возбуждаемых биполярными импульсами / В.И. Кошелев, В.В. Плиско // *Радиотехника и электроника*. – 2021. – Т. 66, № 12. – С. 1172–1177.

20. Сравнение эффективных потенциалов сверхширокополосных комбинированных и спиральных антенн / Ю.А. Андреев, С.С. Смирнов, К.В. Завьялова, Я. Се, Я. Цю // *Изв. вузов. Физика*. – 2020. – Т. 63, № 2. – С. 61–67.

21. Balanis A.C. *Antenna Theory: Analysis and Design*. – 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2016. – 1104 p.

Liu S., Andreev Yu.A., Belichenko V.P.

### On two radiation centers in a combined ultra-wideband antenna

An explanation is given for the existence of two radiation centers of a combined antenna in the mode of its excitation by bipolar voltage pulses of nanosecond duration. It is shown that the existence of spatially separated radiation centers in the combined antenna is primarily related to the geometry of the TEM horn used in the antenna as an electric-type radiator.

**Keywords:** combined antenna, ultra-wideband antenna, phase center, radiation center.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2025-28-1-33-38

### References

1. Prather W.D., Baum C.E., Lehr, J. M., O'Loughlin J.P., Tyo S., Schoenberg J.S., Torres R.J., Tran T.C., Scholfield D.W., Gaudet J., Burger J.W. Ultra-Wideband Source and Antenna Research // *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, vol. 28, no. 5, pp. 117–130.

2. Ryu J., Kim K., Lim T.H., Kwon H.O., Kuk J.H., Choi J.S., Baek S.H., Yu J.W. Integrated-Antenna-Source of Directive Peak Electric-Field Patterns for High-Power Ultrawideband Parabolic Reflector System. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, vol. 18, no. 4, pp. 727–731.

3. Andreev Y.A., Buyanov Y.I., and Koshelev V.I. A combined antenna with extended bandwidth. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2005, vol. 50, no. 5, pp. 535–543.

4. Andreev Y.A., Buyanov Y.I., Koshelev V.I., Shukhushin K.N. An element of the scanning antenna array for the emission of powerful electromagnetic pulses. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 1999, vol. 44, pp. 492–498.

5. Koshelev V.I., Buyanov Yu.I., Andreev Yu.A., Plisko V.V., Sukhushin K.N. Ultrawideband radiation of high-power pulses. *Proceedings of the IEEE Pulsed Power Plasma Scientific Conference*, 2001, vol. 2, pp. 1661–1664.

6. Andreev Yu.A., Gubanov V.P., Efremov A.M. et al. High-power ultrawideband radiation source. *Laser and Particle Beams*, 2003, vol. 21, pp. 211–217.

7. Koshelev V.I., Plisko V.V. Structure of arrays of ultrawideband combined antennas. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2021, vol. 62, no. 6, pp. 565–568.

8. Gubanov V.P., Efremov A.M., Koshelev V.I., Kovalchuk B.M., Plisko V.V., Rostov V.V., Stepchenko A.S. A source of high-power pulses of ultrawideband radiation with a nine-element array of combined antennas. *Instruments and Experimental Techniques*, 2017, vol. 60, no. 2, pp. 213–218.

9. Koshelev V.I., Buyanov Y.I., and Belichenko V.P. *Ultrawideband Short-Pulse Radio Systems*. Norwood, MA, USA: Artech House, 2017, 432 p.

10. Wang Shao-fei and Xie Yan-zhao. Design and optimization of high-power UWB combined antenna based on Klopfenstein impedance taper. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, vol. 65, no. 12, pp. 6960–6967.

11. Mehrdadian Ali and Keyvan Forooghi. Design and Fabrication of a Novel Ultrawideband Combined Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, vol. 13, pp. 95–98.

12. Hyvernaud J., Reineix G., Negrier R., Andrieu J., Lande M. and Couderc V. Optoelectronic generation of transient waveforms for UWB radars with rejected frequencies. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2020, no. 12, pp. 543–550.

13. Kim J.S., Young-Joong Y., Hae-Ok K., J. Ryu, J. Soo Choi. A Directive Subminiature Antenna for High-Power Ultrawideband Pulse Radiation. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, vol. 13, pp. 1565–1568.

### Лю Шууха

Аспирант каф. РСС Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +86-158-40-21-78-55  
Эл. почта: yili0000@163.com

### Андреев Юрий Анатольевич

Канд. ф.-м. наук, доцент каф. физики (КФ) ТУСУРА  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0003-0993-9906  
Тел.: +7 (382-2) 49-19-00  
Эл. почта: lhfehcei@yandex.ru

### Беличенко Виктор Петрович

Д-р ф.-м.н., доцент, проф. каф. радиофизики  
Национального исследовательского  
Томского государственного ун-та (НИ ТГУ)  
Ленина пр-т, 36, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0009-0002-3181-7446  
Тел.: +7 (382-2) 413-463  
Эл. почта: bvp@mail.tsu.ru

Поступила в редакцию: 20.03.2025.

Принята к публикации: 14.04.2025.

14. Elmansouri Mohamed A., Filipovic Dejan S. TEM horn inspired wideband antennas for diverse applications. *2019 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, 2019, pp. 016–019.

15. Balzovsky E.V., Koshelev V.I., Shipilov S.E. [An element of a scanning antenna array for the emission of powerful electromagnetic impulsshigh-wideband sensing of objects behind radio-transparent obstacles]. *Russian Physics Journal*, 2010. vol. 53, no. 9-2, pp. 83– 87 (in Russ.).

16. Andreev Yu.A., Efremov A.M., Koshelev V.I., Kovalchuk B.M., Petkun A.A., Sukhushin K.N., Zorkaltseva M.Yu. A source of high-power pulses of elliptically polarized ultrawideband radiation. *Review of Scientific Instruments*, 2014, vol.85, pp. 104703 (8).

17. Zorkal'tseva M.Y., Koshelev V.I., Petkun A.A. Numerical modeling of ultra wideband combined antennas. *Russian Physics Journal*, 2017, vol. 60, no. 8, pp. 1291–1297.

18. Andreev Yu.A., Kornienko V.N., Liu S. Method for radiation center position measurements of a combined antenna in the pulsed mode. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, vol. 66, no. 8, pp. 4269–4276.

19. Koshelev V.I., Plisko V.V. The phase center and center of radiation of combined antennas excited by bipolar pulses. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2021, vol. 66, no. 12, pp. 1330–1335.

20. Andreev Y.A., Smirnov S.S., Zavyalova K.V., Xie Y., Qiu Y. Comparison of the effective potentials of ultrawideband combined and helical antennas. *Russian Physics Journal*, 2020, vol. 63, no 2, pp. 250–257.

21. Balanis A.C. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2016, 1104 p.

#### **Shuhua Liu**

Postgraduate student, Department of Radioelectronics and Communication Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +86-158-40-21-78-55  
Email: yili0000@163.com

#### **Yury A. Andreev**

Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Physics TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0003-0993-9906  
Phone: +7 (382-2) 49-19-00  
Email: lhfehcei@yandex.ru

#### **Viktor P. Belichenko**

Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor, Department of Radiophysics, National Research Tomsk State University (TSU) 36, Lenin pr., Tomsk, Russia, 63405  
ORCID: 0009-0002-3181-7446  
Phone: +7 (382-2) 41-34-63  
Email: bvp@mail.tsu.ru

Received: 20.03.2025.

Accepted: 14.04.2025.