

АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ
СИСТЕМЫ

УДК 621.373

ФАЗОВЫЙ ЦЕНТР И ЦЕНТР ИЗЛУЧЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ
АНТЕНН, ВОЗБУЖДАЕМЫХ БИПОЛЯРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ© 2021 г. В. И. Кошелев^а, *, В. В. Плиско^а^аИнститут сильноточной электроники СО РАН,
просп. Академический, 2/3, Томск, 634055 Российская Федерация

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

Поступила в редакцию 17.03.2021 г.

После доработки 17.03.2021 г.

Принята к публикации 17.04.2021 г.

Численно исследована комбинированная антенна, оптимизированная для возбуждения биполярным импульсом длительностью 3 нс, с использованием трех подходов. Показано, что частичный фазовый центр антенны на центральной частоте спектра 350 МГц в H -плоскости находится в середине антенны, а в E -плоскости — ближе к плоскости апертуры антенны. Центр излучения находится между частичными фазовыми центрами на расстоянии от плоскости апертуры, примерно равном $1/4$ длины антенны.

DOI: 10.31857/S0033849421120135

ВВЕДЕНИЕ

Мощные источники сверхширокополосного (СШП) излучения разрабатываются для исследований эффектов воздействия электромагнитного поля на электронные системы и биологические объекты, а также для радаров с высоким пространственным разрешением [1–6]. При их разработке используются различные физические подходы. В данной работе кратко рассмотрим только мощные СШП-источники на основе комбинированной антенны (КА) с расширенной полосой частот [7, 8].

В Институте сильноточной электроники создана линейка мощных источников СШП-излучения на основе решеток КА, возбуждаемых биполярными импульсами длительностью 0.2 [9], 0.5 [10], 1 [11, 12], 2 [13, 14] и 3 нс [15]. Наряду с применением многоэлементных решеток для увеличения эффективного потенциала излучения, определяемого как произведение пиковой напряженности электрического поля E_p на расстояние r в дальней зоне (rE_p), был разработан также мощный СШП-источник на основе офсетного параболического отражателя и одиночной КА, возбуждаемой биполярным импульсом длительностью 1 нс [16].

При исследовании характеристик излучения вблизи КА, возбуждаемой биполярными импульсами, радиолокационных измерениях, синтезе излучения [17], оптимизации отражательной антенны [16] представляет интерес знание положения центра излучения (ЦИ) антенны. Применительно к узкополосному излучению фазовый центр (ФЦ)

одиночных антенн и многоэлементных решеток рассмотрен достаточно детально [18–20]. Показано, что ФЦ антенн в двух перпендикулярных плоскостях могут не совпадать. ФЦ может существовать для ограниченного углового размера диаграммы. В этом случае его определяют как частичный ФЦ или ЦИ [20].

Первые измерения положения ЦИ комбинированной антенны были выполнены в работе [21]. В экспериментах КА возбуждали биполярным импульсом длительностью 0.2 нс [9]. Излученный сигнал принимался аналогичной антенной. Измерения проводили при наличии и отсутствии листа полиэтилена толщиной 27 см или кирпичной стены толщиной 15 см. Приемную антенну перемещали в H -плоскости по дуге окружности с шагом 2° . Для каждого положения антенны определяли время t_f характерной точки осциллограммы зарегистрированных импульсов. По минимуму среднеквадратичного отклонения измеренных t_f относительно дуги окружности определяли ЦИ. Разброс результатов измерений относительно длины антенны был значительный. Результаты усредняли по нескольким сериям измерений. Из полученных оценок следовало, что ЦИ в H -плоскости практически не зависел от диэлектрического препятствия и находился примерно в геометрическом центре антенны. В последующих измерениях [22] в свободном пространстве в двух плоскостях использовали созданные ранее КА, возбуждаемые биполярными импульсами длительностью 1 и 2 нс. Было показано, что ЦИ в H -плоскости находится

примерно на расстоянии $(1/3...1/2) L$ от внутренней поверхности задней стенки антенн (L — длина антенны), а ЦИ в E -плоскости — вблизи плоскости апертуры антенн.

Положение ЦИ для главного направления диаграммы вдоль оси КА, оптимизированных для возбуждения биполярными импульсами длительностью 0.5, 1, 2 и 3 нс, было оценено по результатам численного моделирования [23]. Известно [4], что границу дальней зоны для СШП-излучения можно оценивать по критерию $rE_n \approx \text{const}$. Для оценки положения ЦИ на оси Ox использовали критерий $(x - x_0)E_n \approx \text{const}$. Положение ЦИ x_0 оценивали из условия минимального расстояния до границы дальней зоны только на оси, а не для H -плоскости, как ошибочно указано в статье [23]. Из полученных результатов следует, что среднее значение координаты ЦИ вдоль оси Ox для четырех антенн равно $x_0/L = 0.76$. При этом среднее значение отношения высот $ТЕМ$ -рупоров КА к центральной длине волны спектра биполярных импульсов напряжения (излучения) в точке x_0 равно 0.17. Отметим, что в этих расчетах использовали программу [24], разработанную на основе метода конечных разностей во временной области. Ранее с использованием данного подхода и разработанной программы были выполнены оценки положения ЦИ для осевого излучения цилиндрических [25–27] и конической [28] спиральных антенн, возбуждаемых биполярными импульсами.

Из приведенных выше результатов видно, что для оценки положения ЦИ в КА были использованы разные подходы и разные геометрии антенн, что затрудняет их сравнение. Целью данной работы является оценка положения ЦИ в одной КА с использованием предложенных подходов в численной модели.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для численного моделирования мы выбрали КА, оптимизированную для возбуждения биполярным импульсом длительностью 3 нс. Эта антенна имеет размеры $450 \times 450 \times 476$ мм³ и хорошо изучена экспериментально [15, 17, 29, 30] и численно [23]. Она имеет практически симметричную диаграмму в двух плоскостях с полной шириной на половинном уровне по пиковой мощности, равной примерно 80°. Полоса согласования антенны с фидером с волновым сопротивлением 50 Ом широкая. Отношение граничных частот по уровню коэффициента стоячей волны по напряжению 2 достигает 10. Это обеспечивает малые искажения импульса излучения.

Расчеты проводили в рамках трех подходов с использованием компьютерного кода CST Studio Suite. В первом подходе расчеты выполняли на центральной частоте спектра биполярного импульса,

равной 350 МГц. В этих расчетах для оценки положения ФЦ использовали критерий равенства фазы на дуге окружности с заданным угловым размером. Положения частичного ФЦ в двух плоскостях оценивали в пределах углов $\pm 45^\circ$ относительно главного направления.

Во втором подходе для оценки ЦИ проводили расчеты излученных импульсов в дальней зоне с использованием пересчета поля из ближней зоны в дальнюю. Углы варьировали в двух плоскостях в пределах $\pm 45^\circ$ относительно главного направления с шагом 5° . В процессе расчетов изменяли координаты центра вдоль оси. ЦИ оценивали по минимуму задержек максимумов импульсов излучения в заданном диапазоне углов относительно максимума импульса излучения в главном направлении на заданном радиусе.

При реализации третьего подхода КА помещали в расчетную область размером $2.85 \times 2.85 \times 5.4$ м³. Внутри расчетной области размещали датчики поля вдоль оси антенны и под углом $\pm 10^\circ$ в двух плоскостях с шагом 10 см. Эти прямые расчеты выполняли для оценки положения ЦИ с использованием критерия дальней зоны. Геометрия задачи для этого варианта расчетов приведена на рис. 1. Отметим, что в прямоугольной системе координат (см. рис. 1) координата r_0 положения ФЦ или ЦИ соответствует z_0 .

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Первоначально были получены оценки частичных ФЦ антенны на оси в двух плоскостях для центральной частоты спектра биполярного импульса 350 МГц. Для заданного диапазона углов оценено положение ФЦ в H -плоскости на расстоянии от внешней поверхности задней пластины $z_0 = 235$ мм. При этом отношение $z_0/L = 0.49$. Среднеквадратичное отклонение продольной координаты фазового центра $\sigma = 2.4$ мм.

Частичный ФЦ в E -плоскости находится на расстоянии $z_0 = 438$ мм. При этом отношение $z_0/L = 0.92$. Среднеквадратичное отклонение продольной координаты ФЦ равно $\sigma = 6.7$ мм.

Из расчетов следует, что форма импульса излучения зависит от угла. Это является причиной погрешности определения координат ЦИ в экспериментах. В расчетах было получено, что минимальное различие по времени между максимумами импульсов излучения в H -плоскости в пределах $\pm 45^\circ$, равное $\Delta t = 0.04$ нс, соответствует продольной координате $z_0 = 225...235$ мм. На рис. 2 приведены импульсы излучения, рассчитанные в дальней зоне при координате $z_0 = 225$ мм для диапазона углов $0^\circ...45^\circ$ в силу симметрии геометрии антенны в H -плоскости. Отметим, что при указанных выше координатах максимумы импульсов излучения в

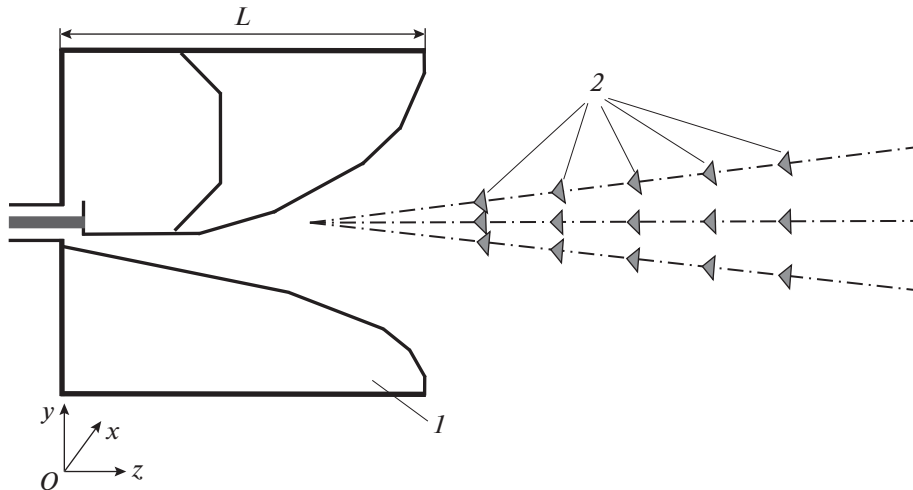


Рис. 1. Геометрия расчетной задачи: 1 — комбинированная антенна, 2 — датчики поля в E -плоскости.

E -плоскости существенно сдвинуты относительно главного направления, $\Delta t = 0.2$ нс.

Аналогичные расчеты были выполнены в E -плоскости. Было показано, что минимальное различие по времени задержки максимумов импульсов излучения в диапазоне углов $\pm 45^\circ$ соответствует координате $z_0 = 435...440$ мм. При этом в H -плоскости временные задержки максимумов импульсов при указанных координатах возрастают. На рис. 3 представлены расчетные импульсы излучения для E -плоскости в диапазоне углов $\pm 45^\circ$ для $z_0 = 438$ мм. Отметим, что положение точки смены полярности сигнала существенно зависит от угла, что приводит к погрешности измерений положения ЦИ при использовании ее как характерной точки на осциллограмме.

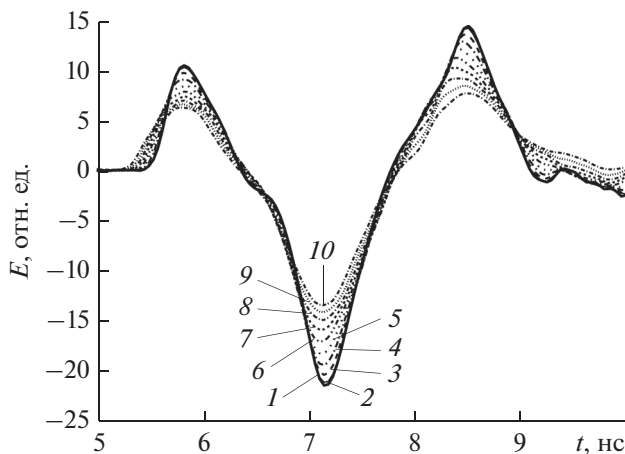


Рис. 2. Импульсы излучения, рассчитанные в дальней зоне в H -плоскости для $z_0 = 225$ мм и углов 0° (1), 5° (2), 10° (3), 15° (4), 20° (5), 25° (6), 30° (7), 35° (8), 40° (9) и 45° (10).

Геометрия задачи для оценки положения ЦИ с использованием критерия дальней зоны приведена на рис. 1. На рис. 4 представлены осциллограммы импульсов генератора U_r (кривая 1) и излучения E на оси: измеренного в дальней зоне (кривая 2), рассчитанных в дальней зоне (кривая 3) и на расстоянии от антенны 3 м (кривая 4). Формы импульсов излучения в дальней зоне (кривые 2 и 3) различаются наиболее существенно в третьем временном лепестке. Отметим, что в измерениях и расчетах использовали одинаковый биполярный импульс длительностью 3 нс. Увеличение длительности экспериментального импульса излучения относительно расчетного обусловлено временным разрешением измерительной систе-

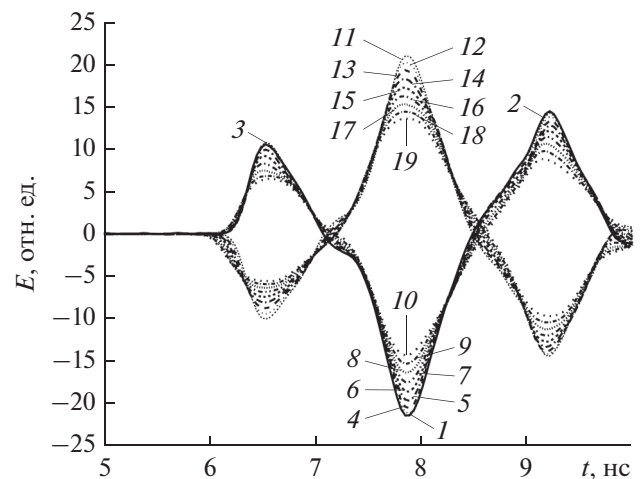


Рис. 3. Расчетные импульсы излучения для E -плоскости при $z_0 = 438$ мм и при значениях углов в диапазоне $\pm 45^\circ$: 0° (1), 5° (2), 10° (3), 15° (4), 20° (5), 25° (6), 30° (7), 35° (8), 40° (9), 45° (10), -5° (11), -10° (12), -15° (13), -20° (14), -25° (15), -30° (16), -35° (17), -40° (18) и -45° (19).

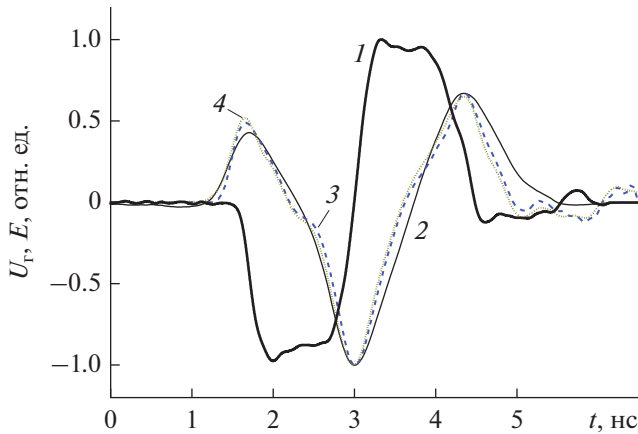


Рис. 4. Осциллограммы импульса напряжения на входе антенны (кривая 1) и импульсов излучения на оси: измеренного в дальней зоне (кривая 2), рассчитанных в дальней зоне (кривая 3) и на расстоянии 3 м от антенны (кривая 4).

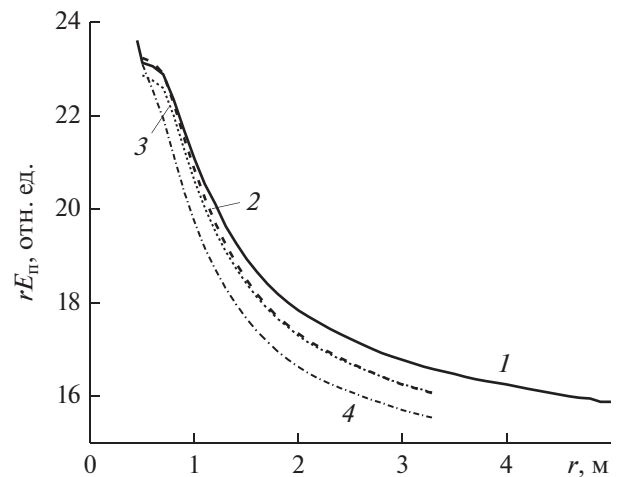


Рис. 5. Зависимости $rE_n(r)$ в сферической системе координат для главного направления (кривая 1), а также в H -плоскости для углов $\pm 10^\circ$ (2) и E -плоскости для угла $+10^\circ$ (3) и -10° (4).

мы. Формы импульсов излучения, рассчитанные в дальней зоне (кривая 3) и на расстоянии 3 м (кривая 4), близки. Различие в длительностях импульсов на входе антенны (кривая 1) и в дальней зоне (кривая 3) обусловлено конечной полосой пропускания и размерами антенны. Вычисленные значения эффективности по пиковой напряженности электрического поля k_E , определяемой как отношение эффективного потенциала излучения rE_n к амплитуде импульса напряжения U_r , равно 2.05 на расстоянии $r = 2.5$ м в прямом расчете и 2.36 при пересчете поля из ближней зоны в дальнюю. В экспериментах [15] получено значение $k_E = 2$, которое хорошо согласуется с результатами расчетов.

Для оценки положения ЦИ в рамках третьего подхода были получены зависимости rE_n от расстояния в сферической системе координат для главного направления, а также в H - и E -плоскостях для углов $\pm 10^\circ$. Результаты расчетов приведены на рис. 5. Расстояние отсчитывали от задней стенки антенны. По результатам этих расчетов строили кривые $(r - r_0)E_n(r)$ [23, 25, 26] и затем оценивали положение ЦИ по минимуму расстояния до границы дальней зоны. На рис. 6 показаны зависимости $(r - r_0)E_n(r)$ для найденного по этой методике положения ЦИ на расстоянии $r_0 = 350$ мм. Для оценки положения границы дальней зоны ($rE_n \approx \text{const}$) на рис. 7 показаны зависимости производных $(r - r_0)E_n$ от расстояния r . Из полученных результатов следует, что дальняя зона формируется на расстоянии от антенны 2.5...3 м.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Мы полагаем, что частичный ФЦ на центральной частоте спектра излучения, который является общим для КА, находится посередине между ФЦ для H - и E -плоскостей. При этом искажения формы излученных импульсов в обеих плоскостях будут примерно одинаковыми. При таком подходе продольная координата общего ФЦ для углового размера диаграммы излучения $\pm 45^\circ$ равна $z_0 = 336.5$ мм, а отношение $z_0/L = 0.71$.

Оценки положения ЦИ в двух плоскостях, полученные с использованием импульсов излуче-

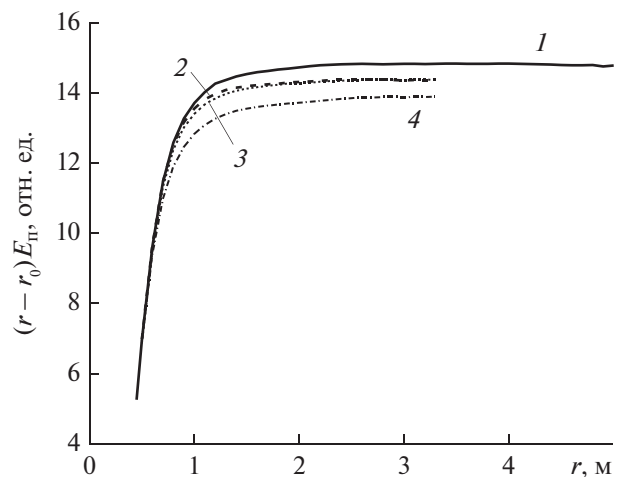


Рис. 6. Зависимости $(r - r_0)E_n(r)$ в сферической системе координат для $r_0 = 350$ мм в главном направлении (кривая 1), а также в H -плоскости для углов $\pm 10^\circ$ (2) и E -плоскости для углов $+10^\circ$ (3) и -10° (4).

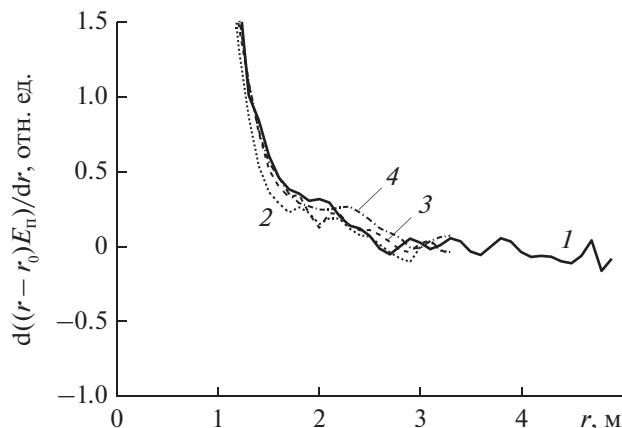


Рис. 7. Зависимости производных $(r - r_0)E_n$ от расстояния r в сферической системе координат для главного направления (кривая 1), а также в H -плоскости для углов $\pm 10^\circ$ (2) и E -плоскости для углов $+10^\circ$ (3) и -10° (4).

ния, рассчитанных в пределах $\pm 45^\circ$, практически совпадают с оценками положения ФЦ для центральной частоты. В этом нет ничего удивительного, так как максимум импульса определяется излучением вблизи максимума спектра на центральной частоте.

Дополнительным аргументом в пользу существования ЦИ антенны, возбуждаемой биполярным импульсом, являются результаты прямых расчетов, позволивших при использовании критерия дальней зоны оценить координату ЦИ ($z_0 = 350$ мм) для углового размера диаграммы излучения в пределах $\pm 10^\circ$ в двух плоскостях. При этом отношение $z_0/L = 0.74$. Полученная оценка положения ЦИ совпадает с результатами расчетов в главном направлении [23], выполненных для этой КА по другой программе, и хорошо согласуется с координатой общего ФЦ ($z_0/L = 0.71$) для двух плоскостей в пределах угловых размеров $\pm 45^\circ$ на центральной частоте спектра импульса.

Диаграмму направленности антенны при излучении СШП-импульса мы строили по пиковой напряженности электрического поля E_n или пиковой мощности E_n^2 в слое с толщиной, равной длительности импульса излучения, умноженной на скорость света [4]. Она отличается от классической диаграммы по окружности или дуге заданного радиуса в дальней зоне. Отсюда понятно, что критерий границы дальней зоны $rE_n \approx \text{const}$ вначале выполняется в главном направлении, а позднее для углов в E - и H -плоскостях (см. рис. 7). Полученные оценки расстояния между КА и границей дальней зоны в главном направлении согласуются с результатами предыдущих расчетов [23] и измерений [29], выполненных с использованием резистивного диполя.

ВЫВОДЫ

Обобщая результаты, полученные в данной работе, а также в предыдущих исследованиях [23], можно полагать, что в КА, возбуждаемых биполярными импульсами, существует ограниченная область пространства, которую можно определить как центр излучения. Согласно расчетам он находится на расстоянии, примерно равном четверти длины антенны от плоскости апертуры антенны. Определенное по нескольким критериям положение центра излучения справедливо для ограниченного диапазона углов в пределах ширины диаграммы направленности на половинном уровне по пиковой мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ultra-Wideband Radar Technology / Ed. J.D. Taylor. Boca Raton: CRC Press LLC, 2000.
2. Giri D.V. High-Power Electromagnetic Radiators: Nonlethal Weapons and Other Applications. Cambridge (MA): Harvard Univ. Press, 2004.
3. Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. High Power Microwaves. N.Y.: Taylor & Francis, 2007.
4. Koshelev V.I., Buyanov Yu.I., Belichenko V.P. Ultrawideband Short-Pulse Radio Systems. Boston: Artech House, 2017.
5. Кузелев М.В., Рухадзе А.А., Стрелков П.С. Плазменная релятивистская СВЧ-электроника. М.: Ленанд, 2018.
6. Giri D.V., Hoard R., Sabath F. High-Power Electromagnetic Effects on Electronic Systems. Boston: Artech House, 2020.
7. Koshelev V.I., Buyanov Yu.I., Andreev Yu.A. et al. // Proc. IEEE Pulsed Power Plasma Science Conf. Las Vegas. 17–22 Jun. 2001. N.Y.: IEEE, V. 2. P. 1661.
8. Андреев Ю.А., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. // РЭ. 2005. Т. 50. № 5. С. 585.
9. Андреев Ю.А., Ефремов А.М., Кошелев В.И. и др. // РЭ. 2011. Т. 56. № 12. С. 1457.
10. Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М. и др. // ПТЭ. 2011. № 1. С. 77.
11. Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М. и др. // РЭ. 2007. Т. 52. № 7. С. 813.
12. Efremov A.M., Koshelev V.I., Kovalchuk B.M. et al. // Laser and Particle Beams. 2014. V. 32. № 3. P. 413.
13. Губанов В.П., Ефремов А.М., Кошелев В.И. и др. // ПТЭ. 2005. № 3. С. 46.
14. Губанов В.П., Ефремов А.М., Кошелев В.И. и др. // ПТЭ. 2017. № 2. С. 61.
15. Андреев Ю.А., Ефремов А.М., Кошелев В.И. и др. // ПТЭ. 2011. № 6. С. 51.
16. Balzovsky E., Buyanov Yu., Gubanov V. et al. // Proc. 20th Int. Symp. on High-Current Electronics. Tomsk. 16–22 Sept. 2018. N.Y.: IEEE, 2018. P. 61.
17. Efremov A.M., Koshelev V.I., Plisko V.V., Sevostyanov E.A. // Rev. Sci. Instrum. 2017. V. 88. № 9. P. 094705.
18. Rhodes D.R. Introduction to Monopulse. N.Y.: McGraw-Hill Book Company Inc., 1959.

19. *Sherman S.M., Barton D.K.* Monopulse Principles and Techniques. Boston: Artech House, 2011.
20. *Вендик О.Г., Парнес М.Д.* Антенны с электрическим сканированием. М.: Сайнс-Пресс, 2002.
21. *Балзовский Е.В., Кошелев В.И., Шупилов С.Э.* // Изв. вузов. Физика. 2010. Т. 53. № 8/2. С. 83.
22. *Andreev Yu.A., Kornienko V.N., Liu S.* // IEEE Trans. 2018. V. AP-66. № 8. P. 4269.
23. *Зоркальцева М.Ю., Кошелев В.И., Петкун А.А.* // Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60. № 8. С. 26.
24. *Зоркальцева М.Ю., Кошелев В.И., Петкун А.А.* // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 8/2. С. 149.
25. *Andreev Yu.A., Efremov A.M., Koshelev V.I. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85. № 10. P. 104703.
26. *Андреев Ю.А., Ефремов А.М., Зоркальцева М.Ю. и др.* // РЭ. 2018. Т. 63. № 8. С. 795.
27. *Зоркальцева М.Ю., Андреев Ю.А., Кошелев В.И.* // Докл. V Всерос. микроволн. конф. Москва. 29 нояб.— 01 дек. 2017. М.: ИРЭ РАН, 2018. С. 10.
28. *Андреев Ю.А., Ефремов А.М., Зоркальцева М.Ю. и др.* // ПТЭ. 2018. Т. 61. № 1. С. 60.
29. *Koshelev V.I., Andreev Yu.A., Efremov A.M. et al.* // J. Energy and Power Engineering. 2012. V. 6. № 5. P. 771.
30. *Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М., Плиско В.В.* // ПТЭ. 2013. № 3. С. 61.