

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.43>

УДК: 621.373

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ ОФСЕТНАЯ ЗЕРКАЛЬНАЯ АНТЕННА

Э.С. Некрасов, Е.В. Балзовский, Ю.И. Буянов, В.И. Кошелев

Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, Томск, проспект Академический, 2/3

Статья поступила в редакцию 25 ноября 2025 г.

Аннотация. Представлены результаты численного моделирования характеристик сверхширокополосной офсетной зеркальной антенны. Офсетное зеркало представляет собой вырезку из параболоида вращения диаметром 1400 мм при фокусном расстоянии 700 мм. В качестве облучателя использована комбинированная антенна, оптимизированная для возбуждения биполярными импульсами длительностью 1 нс. Рассчитаны центр излучения и частичные фазовые центры комбинированной антенны с использованием временной и спектральной методик. Оценена ошибка установки облучателя, при которой напряженность излученного зеркальной антенной поля в главном направлении не меньше 0.95 от напряженности электрического поля при совмещении центра излучения облучателя с фокусом офсетного зеркала. Получены оценки коэффициентов усиления и использования поверхности офсетного зеркала при возбуждении комбинированной антенной в диапазоне частот 0.5-2.5 ГГц.

Ключевые слова: сверхширокополосная комбинированная антенна, офсетная зеркальная антенна, биполярный импульс, центр излучения, частичный фазовый центр.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FWRM-2021-0002).

Автор для переписки: Некрасов Эдуард Сергеевич, es.nekrasov@hcei.ru

Введение

Разработка источников сверхширокополосного излучения на основе зеркальных антенн представляет интерес для решения задач радиолокации с высоким пространственным разрешением [1] и исследования устойчивости объектов к воздействию сильных электромагнитных полей [2,3]. Для уменьшения затенения поля облучателем выгодно использовать офсетное зеркало. Исследования в данной области ведутся достаточно широко [4-8] и направлены в основном на разработку источников излучения с малой пиковой мощностью.

В качестве облучателя офсетной зеркальной антенны мощного источника сверхширокополосного излучения предпочтительно использовать комбинированную антенну [9]. Для исследования характеристик излучения зеркальных антенн важно знать положение центра излучения [10] комбинированной антенны, возбуждаемой биполярным импульсом. Здесь под центром излучения мы понимаем положение эффективного излучателя импульса, при котором искажение временной формы электромагнитного излучения в дальней зоне в двух плоскостях примерно одинаково и минимально. Временная форма импульса электромагнитного излучения является важной характеристикой при решении задачи распознавания объектов в сверхширокополосной радиолокации [1].

Ранее был разработан мощный источник сверхширокополосного излучения с использованием исследуемой офсетной зеркальной антенны [11], и с помощью CST Microwave Studio численно оценены возможности сканирования волновым пучком такой антенны на частотах в диапазоне 0.5-2.5 ГГц [12].

В настоящей работе предлагается с помощью CST Microwave Studio численно определить положение центра излучения комбинированной антенны,

возбуждаемой биполярным импульсом, и оценить влияние положения центра излучения на характеристики офсетной зеркальной антенны. Предлагается оценить положение частичного фазового центра комбинированной антенны в частотном диапазоне 0.5-2.5 ГГц. Наряду со спектральными характеристиками излучения представлялось интересным также оценить коэффициенты усиления и использования поверхности офсетного зеркала при возбуждении комбинированной антенной, предназначенной для излучения мощных сверхширокополосных импульсов.

1. Конструкция зеркальной антенны

Модель офсетной зеркальной антенны построена в программе CST Microwave Studio. Внешний вид модели показан на рис. 1. В работе использовано офсетное зеркало диаметром $D = 1400$ мм. Фокусное расстояние составляет 700 мм. В качестве облучателя использована комбинированная антенна, оптимизированная для возбуждения биполярным импульсом длительностью 1 нс. Облучатель располагался вблизи точки фокуса офсетного зеркала. Ось комбинированной антенны направлена на зеркало под углом 45 градусов и зафиксирована. Такой угол наклона является оптимальным.



Рис. 1. Модель офсетной зеркальной антенны.

2. Характеристики комбинированной антенны

Модель комбинированной антенны показана на рис. 2. Длина комбинированной антенны $L = 170$ мм, поперечные размеры составляют 150×150 мм². Рассчитанная полоса согласования изолированной комбинированной антенны по уровню КСВН ≤ 2 занимает диапазон частот 0.4-2.45 ГГц [12]. При расположении облучателя в фокусе зеркальной антенны полоса согласования занимает диапазон 0.46-2.5 ГГц. Исходя из полосы согласования, характеристики облучателя и зеркальной антенны в частотной области будем рассматривать в диапазоне частот 0.5-2.5 ГГц.

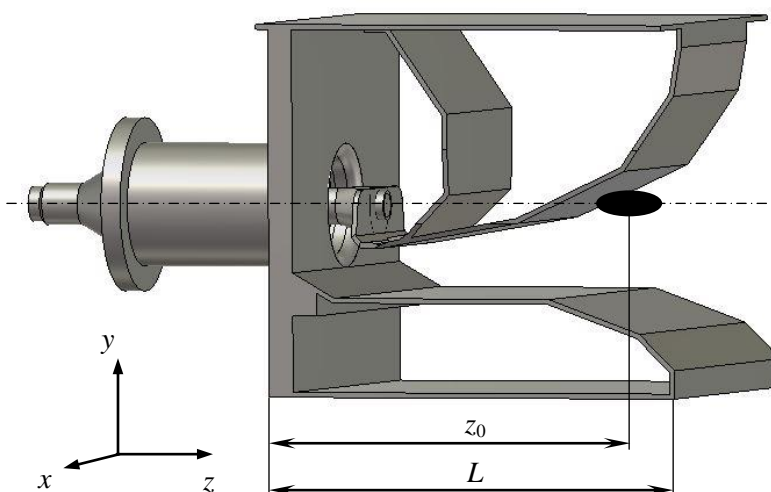


Рис. 2. Модель комбинированной антенны.

Положение центра излучения z_0 комбинированной антенны на оси z при возбуждении биполярным импульсом длительностью 1 нс оценивали из условия минимального расстояния до границы дальней зоны по критерию $(r - z_0)E_n \approx \text{const}$ [10], где r – расстояние вдоль z , E_n – пиковая напряженность электрического поля. Отсчет z_0 производился от задней внешней стенки антенны. Зависимости $(r - z_0)E_n(r)$ при разных значениях положения центра излучения z_0 показаны на рис. 3. При положении центра излучения $z_0 = 123$ мм достигается минимальное расстояние, при котором $(r - z_0)E_n \approx \text{const}$, и составляет 0.6 м. Таким образом, при фокусном расстоянии 0.7 м зеркало находится в дальней

зоне облучателя. При длине антенны $L = 170$ мм отношение $z_0/L = 0.72$, что хорошо согласуется с результатами, полученными в [13].

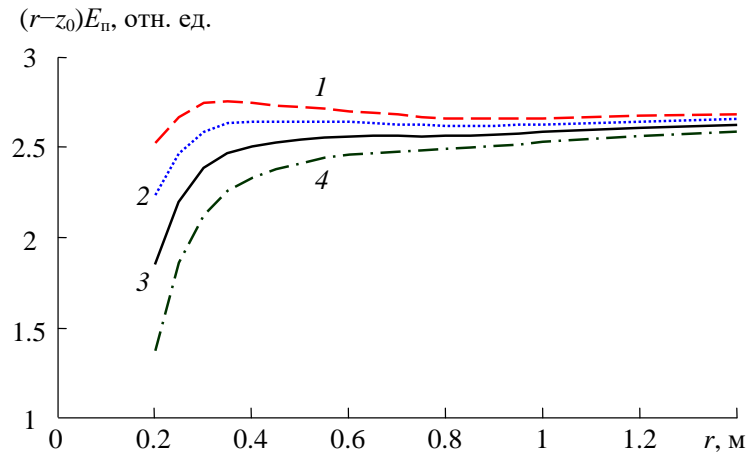


Рис. 3. Зависимости $(r - z_0)E_n(r)$ при значениях положения центра излучения $z_0 = 100$ (1), 110 (2), 123 (3) и 140 (4) мм.

Положения частичных фазовых центров были оценены на частотах в диапазоне 0.5-2.5 ГГц. Для заданного диапазона углов ± 45 градусов вдоль оси z антенны определены частичные фазовые центры в H - и E -плоскостях. Диапазон ± 45 градусов выбран, исходя из средней ширины диаграмм направленности по пиковой напряженности поля в H - и E -плоскостях комбинированной антенны. В H -плоскости ширина диаграммы направленности антенны по уровню 0.707 от максимума составляет 84 градуса, в E -плоскости – 98 градусов.

Положение частичного фазового центра общего для обеих плоскостей может быть определено как среднее значение между частичными фазовыми центрами в H - и E -плоскостях [10]. На рис. 4 показаны зависимости положения частичного фазового центра z_f (а) и его среднеквадратичного отклонения σ_f (б) от частоты комбинированной антенны. Среднее значение положения частичного фазового центра антенны z_f в диапазоне частот 0.5-2.5 ГГц равно 116 мм. Максимальная энергия в спектре биполярного импульса длительностью 1 нс находится вблизи частоты 1 ГГц. На частоте 1 ГГц положение частичного фазового центра вдоль оси z составляет 128 мм от задней стенки антенны, что хорошо согласуется с оценкой положения центра излучения $z_0 = 123$ мм, полученной во временной области.

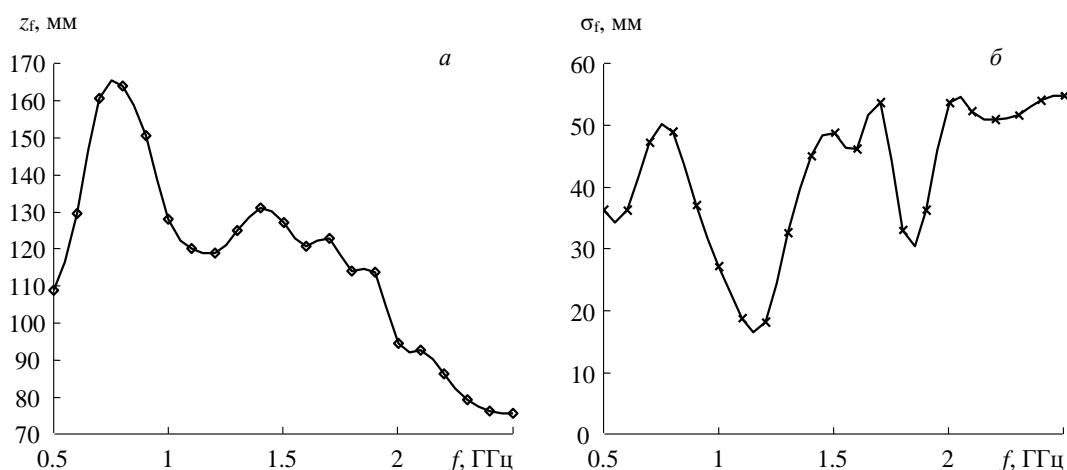


Рис. 4. Зависимости положения частичного фазового центра z_f (а) и его среднеквадратичного отклонения σ_f (б) от частоты комбинированной антенны.

Оценена частотная зависимость коэффициента усиления K_y комбинированной антенны и показана на рис. 5. В диапазоне 0.5-2.5 ГГц коэффициент усиления меняется от 1.4 до 9.9 дБ, максимальное значение достигается на частоте 2.2 ГГц. Провал на частоте вблизи 1.7 ГГц связан с увеличением ширины диаграммы направленности комбинированной антенны. Коэффициент усиления антенны вблизи частоты 1 ГГц составляет 6 дБ.

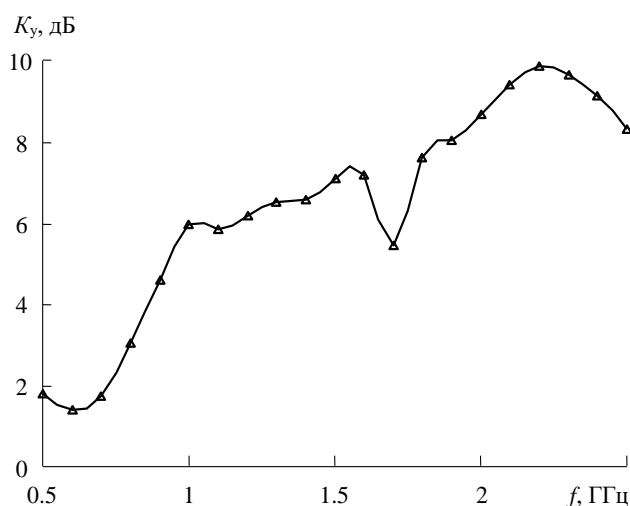


Рис. 5. Частотная зависимость коэффициента усиления комбинированной антенны.

3. Характеристики офсетной зеркальной антенны

Расчет характеристик зеркальной антенны производился при положении центра излучения комбинированной антенны $z_0 = 123$ мм. Диаграммы

направленности по пиковой напряженности электрического поля $E_{\text{п}}$ зеркальной антенны при отклонениях центра излучения облучателя от фокуса зеркальной антенны в H - и E -плоскостях показаны на рис. 6.

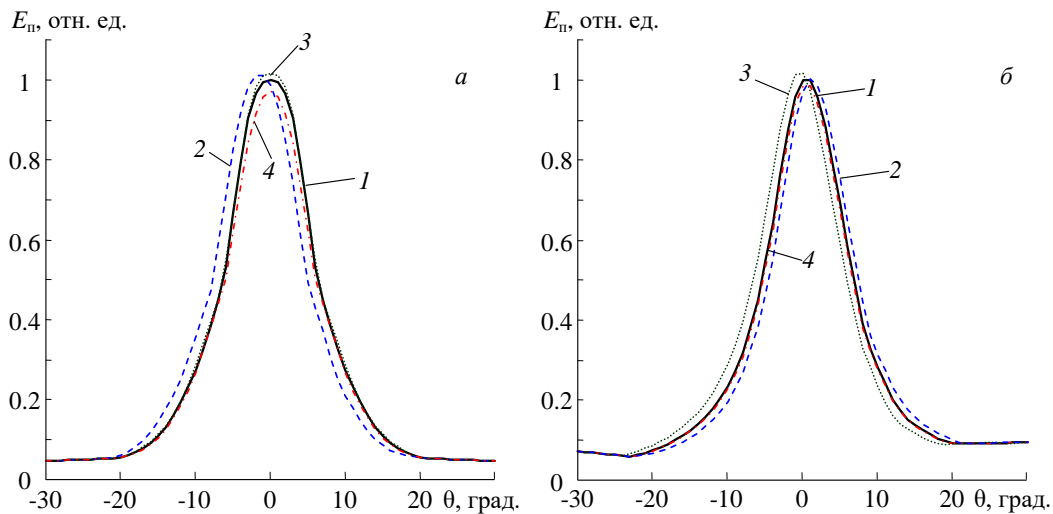


Рис. 6. Диаграммы направленности по пиковой напряженности поля зеркальной антенны в H -плоскости (а) и E -плоскости (б) при размещении центра излучения облучателя в фокусе (1) и при смещениях $x = 25$ мм (2), $y = 25$ мм (3), $y = -25$ мм (4).

Для построения диаграмм направленности по пиковой напряженности поля на сфере радиусом $R = 25$ м вблизи оси зеркальной антенны были установлены датчики поля E -farfield в двух перпендикулярных плоскостях. Облучатель перемещался вертикально по оси y и горизонтально по оси x . При смещении центра излучения облучателя из точки фокуса зеркальной антенны на величину $x = y = \pm 25$ мм напряженность электрического поля в дальней зоне составляет не меньше 0.95 по сравнению с напряженностью поля, полученной при размещении центра излучения в точке фокуса (рис. 6, кривая 1). Смещение центра излучения комбинированной антенны из фокуса зеркальной антенны на величину $y = 25$ мм (рис. 6, кривая 3) позволяет незначительно увеличить напряженность поля на оси излучения офсетной зеркальной антенны. Ширина диаграммы направленности по уровню 0.707 относительно максимума поля при размещении центра излучения облучателя в фокусе зеркала в H -плоскости составляет 9.3 градусов, в E -плоскости – 8.2 градусов.

Для оценки спектральных характеристик центр излучения комбинированной антенны совмещался с точкой фокуса зеркала. Форма импульса генератора $U_{\Gamma}(t)$ (а) на входе комбинированной антенны и его спектр $S(f)$ (б) показаны на рис. 7. Использован реальный импульс генератора производства НПП «Трим». Длительность импульса составляет примерно 1 нс. Ширина спектра, оцененная по уровню -10 дБ, составляет 1.53 ГГц и занимает диапазон частот 0.15-1.68 ГГц. Максимальное значение амплитуды спектра находится на частоте 0.72 ГГц.

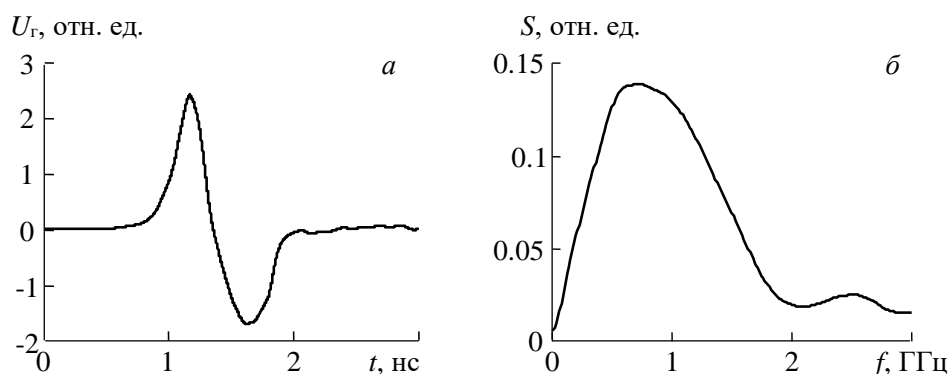


Рис. 7. Импульс генератора (а) на входе облучателя и его спектр (б).

Форма излученного комбинированной антенной импульса $E(t)$ (а) и его спектр (б) показаны на рис. 8.

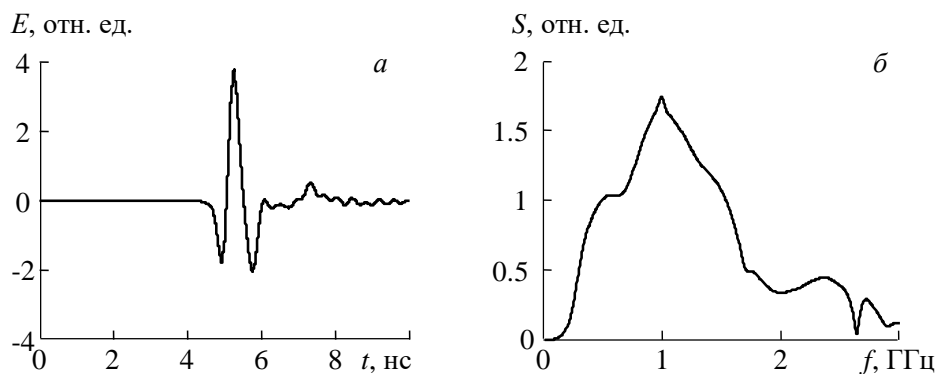


Рис. 8. Излученный облучателем импульс (а) и его спектр (б).

Длительность импульса составляет примерно 1.25 нс. При этом ширина спектра составляет 1.37 ГГц и занимает диапазон частот 0.31-1.68 ГГц. Видно, что нижняя граничная частота спектра, излученного комбинированной антенной импульса, сдвигается в область более высоких частот по сравнению с нижней

граничной частотой спектра импульса возбуждения, и ширина спектра уменьшается. Максимум спектра также сдвигается в область более высоких частот и находится на частоте 1 ГГц.

Форма излученного зеркальной антенной импульса (а) и его спектр (б) показаны на рис. 9. Длительность импульса составляет 1.5 нс. Нижняя граничная частота спектра импульса сдвигается в область высоких частот по сравнению с нижней граничной частотой спектра излученного облучателем импульса. Спектр занимает диапазон частот 0.49-1.63 ГГц и имеет ширину 1.14 ГГц. Максимум амплитуды спектра находится на частоте 1.18 ГГц.

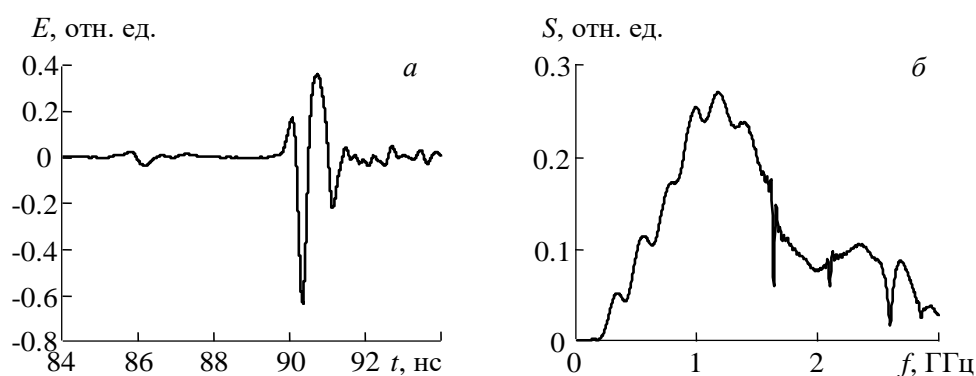


Рис. 9. Излученный зеркальной антенной импульс (а) и его спектр (б).

Оценена частотная зависимость коэффициента усиления офсетной зеркальной антенны в диапазоне частот 0.5-2.5 ГГц и показана на рис. 10.

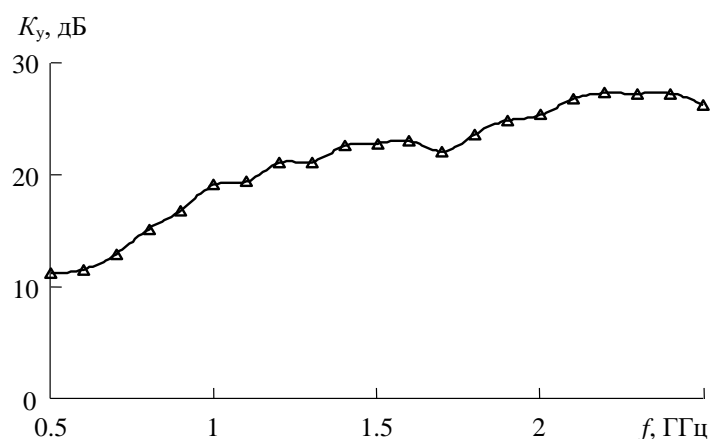


Рис. 10. Частотная зависимость коэффициента усиления офсетной зеркальной антенны.

Значение коэффициента усиления изменяется от 11.2 до 27.3 дБ. Максимальное значение K_y достигается на частоте 2.2 ГГц. Уменьшение

коэффициента усиления зеркальной антенны вблизи частоты 1.7 ГГц связано с уменьшением коэффициента усиления комбинированной антенны вблизи данной частоты.

Оценена частотная зависимость коэффициента использования поверхности офсетной зеркальной антенны в диапазоне частот 0.5-2.5 ГГц и показана на рис. 11. Оценка проведена с использованием известного соотношения: $\eta_A = K_y \lambda^2 / 4\pi S$, где λ – длина волны, $S = \pi D^2 / 4$ – физическая площадь зеркальной антенны. Коэффициент использования поверхности офсетной зеркальной антенны изменяется от 0.18 до 0.52. Максимальное значение η_A находится вблизи частоты 2.15 ГГц. Вблизи частоты 1 ГГц среднее значение коэффициента использования поверхности составляет около 0.35.

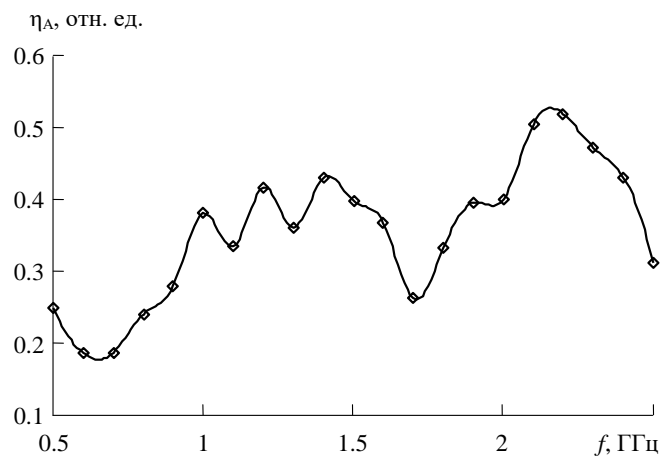


Рис. 11. Частотная зависимость коэффициента использования поверхности офсетной зеркальной антенны.

Заключение

Численно исследованы характеристики сверхширокополосной офсетной зеркальной антенны. Найден центр излучения комбинированной антенны при возбуждении биполярным импульсом напряжения длительностью 1 нс. Центр излучения находится на расстоянии 123 мм от задней стенки антенны. Получена зависимость положения частичного фазового центра комбинированной антенны в диапазоне частот 0.5-2.5 ГГц. Показано, что положение центра излучения, оцененное во временной области, согласуется с оценкой положения частичного фазового центра на частоте 1 ГГц вблизи максимума спектра излучения.

Определена ошибка установки центра излучения облучателя относительно фокуса офсетного зеркала, при которой напряженность поля в дальней зоне уменьшается не более, чем на 5 процентов. Ошибка составляет ± 25 мм. Рассчитаны спектральные характеристики излучения, из которых видно, что нижняя граничная частота смещается в область более высоких частот, при этом уменьшается ширина спектра. Показано, что в диапазоне частот 0.5-2.5 ГГц при использовании комбинированной антенны коэффициенты усиления и использования поверхности офсетного зеркала изменяются в пределах 11.2-27.3 дБ и 0.18-0.52 соответственно.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FWRM-2021-0002).

Литература

1. Taylor J. D. (ed.). Ultra-wideband radar technology. – CRC press, 2000.
2. Giri D. V., Sabath F., Hoad R. High-power electromagnetic effects on electronic systems. — Artech House, 2020.
3. Ariztia L., et al. A high-power electromagnetic source for disabling improvised explosive devices // High Voltage. — 2024. — V. 9. — No. 2. — P. 403–409. <https://doi.org/10.1049/hve2.12416>
4. Dirk I.L. de Villiers, Fahmi Mokhupuki and Brandt Klopper. Low-Cost Frequency Variation Models of Quad-Ridge Flared Horn Reflector Feed Antennas // 2018 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO). — Reykjavik, Iceland, 2018. — P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/NEMO.2018.8503400>
5. Fan Yang, Dong Li, Biao Du, et al. Development of a 6-18GHz Quad-Ridged Flared Horn // 2018 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). — Auckland, New Zealand, 2018. — P. 108–109. <https://doi.org/10.1109/APCAP.2018.8538284>

6. Jonas Flygare, Miroslav Pantaleev. Dielectrically loaded quad-ridge flared horn for beamwidth control over decade bandwidth optimization, manufacture, and measurement // IEEE Trans. Antennas Propag. — 2020. — V. 68. — No. 1. — P. 207–216. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2940529>
7. Калошин В.А., Тхань Нгуен Тхе. Сверхширокополосный металлодиэлектрический облучатель на основе пирамидального рупора // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. — 2023. — № 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.4.3>
8. Калошин В.А., Нгуен Т.Т. Двухполяризационный сверхширокополосный металлодиэлектрический облучатель // Радиотехника и электроника. — 2024. — Т. 69. — № 10. — С. 954–959. <https://doi.org/10.31857/S0033849424100036>
9. Balzovsky E. V., et al. Ultrawideband combined antenna with improved matching // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing, 2018. — V. 363. — No. 1. — P. 012002. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/363/1/012002>
10. Кошелев В.И., Плиско В.В. Фазовый центр и центр излучения комбинированных антенн, возбуждаемых биполярными импульсами // Радиотехника и электроника. — 2021. — Т. 66. — №. 12. — С. 1172–1177. <https://doi.org/10.31857/S0033849421120135>
11. Balzovsky E., et al. A high-power source of ultrawideband radiation with reflector antenna // 2018 20th International Symposium on High-Current Electronics (ISHCE). — IEEE, 2018. — P. 61–65. <https://doi.org/10.1109/ISHCE.2018.8521226>
12. Nekrasov E.S., et al. Directional characteristics of an ultrawideband offset reflector antenna in the scanning mode with a pattern in the 0.5–2.5 GHz frequency range // Proceedings of 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE–2024). — Tomsk, 2024. — P. 266–271. <https://doi.org/10.56761/EFRE2024.S3-O-028401>

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

Для цитирования:

Некрасов Э.С., Балзовский Е.В., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. Сверхширокополосная офсетная зеркальная антенна. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.43>