

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.7.1>

УДК: 621.373

МОДИФИКАЦИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ СШП АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ МОД

Ю.А. Андреев, В.П. Беличенко, В.В. Плиско

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

Статья поступила в редакцию 3 июня 2026 г.

Аннотация. Представлен процесс модификации трехмерной СШП комбинированной антенны на основе анализа ее характеристических мод. Он начинается с исследования свойств характеристических мод основных компонентов комбинированной антенны, а затем свойств характеристических мод антенны в целом, с целью выработки концепции эффективного расширения ее рабочей полосы частот. Для этого в частотной области анализируются основные атрибуты теории характеристических мод – частотные зависимости характеристических углов и модальных значений отдельных характеристических мод, а также осуществляется визуализация распределений характеристических токов этих мод. Это позволило получить ценную информацию о вкладе мощностей наиболее значимых характеристических мод в излучаемую антенной мощность и, основываясь на тщательном анализе распределений токов мод в окрестности узла питания антенны, предложить продуктивный принцип расширения ее рабочей полосы частот. Этот принцип был воплощен в конструкции экспериментальной модели модифицированной комбинированной СШП антенны. Результаты полноволнового моделирования антенны и измерений ее параметров и характеристик хорошо согласуются.

Диапазон рабочих частот антенны по уровню КСВН < 2 составляет 0.5 – 2.75 ГГц. Модифицированная антенна имеет более высокий коэффициент усиления, чем исходная антенна, практически во всей рабочей полосе частот. Наибольшее его увеличение наблюдается в диапазоне от 1.9 до 2.8 ГГц. Эффективный потенциал излучения rE_p модифицированной антенны на 9 % (в эксперименте) и 11 % (при полноволновом моделировании) выше соответствующего значения для исходной комбинированной антенны.

Ключевые слова: характеристическая мода, комбинированная антенна, сверхширокополосная антенна, TEM рупор, анализ в частотной и временной областях, рабочая полоса частот антенны.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FWRM-2026-0011).

Автор для переписки: Андреев Юрий Анатольевич, lhfehcei@yandex.ru

Введение

Комбинированные антенны (КА) представляют собой компактную комбинацию излучателей электрического и магнитного типов с определенными взаиморасположением и соотношениями амплитуд и фаз, протекающих в них токов. Во второй половине 90-х годов прошлого века Ю.И. Буянов (Томский государственный университет, г. Томск) предложил идею КА, где в качестве излучателя электрического типа использовался TEM-рупор [1]. Характеристики излучения КА были оптимизированы в условиях их возбуждения биполярными импульсами напряжения. Были созданы источники СШП-излучения как с одиночными КА, так и с антенными решетками на их основе. В этих источниках использовались генераторы с биполярными импульсами напряжения длительностью 0.2-3 нс и частотой следования импульсов до 100 Гц. Характеристики одиночной КА и источников СШП излучения с одиночной КА были подробно исследованы в [2-4]. Подробные

исследования решеток КА и источников СШП излучения с излучателем в виде решетки КА проведены в [5-7]. Работы по созданию СШП комбинированных антенн и источников СШП излучения, в которых они используются в качестве излучателей, обобщены в [8].

Схематическое изображение КА представлено на рис. 1. Антенну можно рассматривать как комбинацию излучателя электрического типа, выполненного в виде ТЕМ-рупора с одним активным и двумя пассивными магнитными диполями. Антенный вход представляет собой переход с коаксиальной линии на две полосковые линии. Нижняя полосковая линия запитывает ТЕМ-рупор, а укороченная верхняя h , в режиме холостого хода, запитывает активный магнитный диполь (рис. 1).

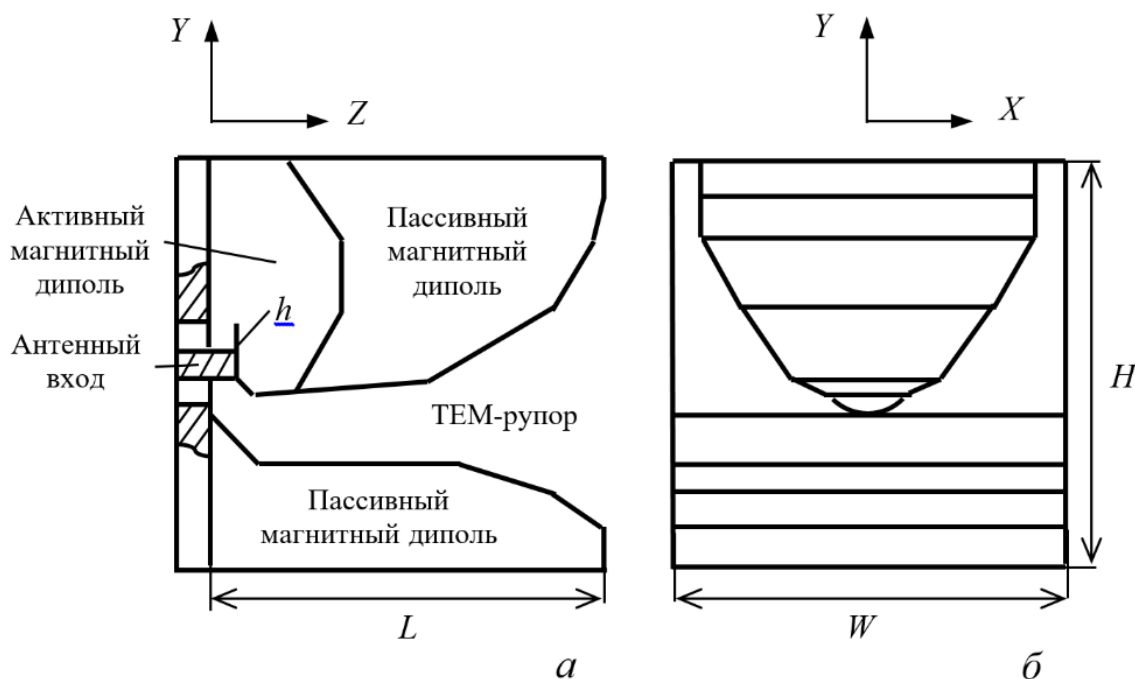


Рис. 1. Схематическое изображение КА: вид сбоку (а), вид спереди (б).

Хотя конструкция КА оказалась весьма удачной, вскоре начались работы по ее модификации. Достаточно очевидным изменением конструкции КА явилось изменение коаксиально-полоскового перехода на входе КА (точнее удаление этого элемента антенны). В большом числе модификаций КА центральный проводник входного коаксиального фидера плавно переходит в верхний лепесток ТЕМ рупора антенны. Это улучшает согласование КА и расширяет полосу рабочих частот [9-13].

Следующим и тоже достаточно очевидным изменением конструкции является оптимизация формы раскрыва ТЕМ рупора КА. Данная работа выполняется обычно вместе с оптимизацией антенного входа [9-13]. Например, в [10] предлагается использовать экспоненциальную форму раскрыва рупора. Заявляется о полосе пропускания 0.18 – 30 ГГц. Метод Клоппенштейна согласования импеданса используется для реализации структуры КА в [13]. Заявляется о полосе пропускания 0.18 – 7 ГГц.

Отметим не столь очевидные модификации КА. Одна из них – это уменьшение ширины антенны [10,12,14]. Исходная КА [1, 2], имеет близкую к кубической форму ($L \cong W = H$, рис. 1), что позволяет сделать ширину диаграммы на половинной мощности в Е- и Н-плоскостях практически одинаковой. В работе [14] необходимость данной модификации объясняется намерением уменьшить площадь апертуры и объем, что в последующем позволило создать компактные антенные решетки [7]. В работе [15] для улучшения характеристик излучения антенны в низкочастотной области в плоские поверхности верхней и нижней пластин были добавлены эллиптические профили. Модификация исходной КА с целью расширения полосы согласования в область высоких частот представлена в [16]. Здесь расширение полосы достигалось уменьшением длины верхней полосковой линии h (рис. 1).

Таким образом, проектирование СШП-антенны обычно осуществляется путем настройки ее параметров в полосе частот или с использованием методов автоматической оптимизации. Исходной физической концепцией в этом случае является идея согласования антенны с фидером. При использовании этих методов процедура проектирования превращается в довольно рутинную задачу, а также утрачивается физическая наглядность.

В то же время, в [17-19] представлен подход к миниатюризации рупорной ТЕМ антенны, обеспечивающий сохранение и даже улучшение ее характеристик. Подход основан на объединении ТЕМ рупора с прямоугольной рамочной антенной для возбуждения двух фундаментальных сферических мод

TE_{m1} и TM_{m1} , с целью улучшения характеристик модифицированной антенны на нижних частотах. Требуемая настройка мод (амплитуда, фаза и частота включения (turn-on frequency)) достигалась авторами на основе изучения спектра сферических мод и путем добавления возмущающих щелей в модифицированную антенну. Показано, что возможно улучшение согласования и коэффициента усиления на нижних частотах, без ухудшения характеристик на высоких частотах.

Следует также отметить, что подход [17-19] не исчерпывает возможности более гибкой и физически более глубокой постановки задачи об улучшении характеристик комбинированных антенн. При теоретическом изучении целого ряда фундаментальных проблем уже давно установлено, что имеется бесконечно много неизлучающих источников таких, что любой из них может быть добавлен к некоторому решению задачи, давая при этом альтернативное решение, для которого внешние поля совпадают с заданным полем (см., например, [20, 21]). Поэтому задачу об определении источника создающего заданное поле излучения, но дополненную условием на уровень его реактивной мощности [21], можно рассматривать как теоретическую основу для улучшения согласования КА антенны. При практической реализации этой задачи целесообразно, по нашему мнению, воспользоваться теорией характеристических мод [22-24], поскольку в отличие от сферических мод [25], они, во-первых, ортогональны как на сфере бесконечного радиуса, так и на поверхности излучающей структуры [22]. Во-вторых, характеристические моды предоставляют уникальные возможности для глубокого изучения процедуры согласования и процесса излучения антенны [22-24].

Проектирование антенн на основе анализа их ХМ признается многими исследователями как чрезвычайно мощный инструмент (см., например, [26-30]). В данной статье такой подход применен для модификации исходной КА [1]. Показано, как результаты расчетов основных атрибутов теории характеристических мод (ТХМ) позволили не только углубить понимание процессов, сопровождающих излучение КА, но и целенаправленно провести ее

модификацию, обеспечившую улучшение ряда параметров и характеристик излучения антенны.

1. Концепция характеристических мод

Гарбач [31] определил ХМ как определенный набор поверхностных токов и излученных полей, которые являются характеристиками исследуемого объекта и не зависят от какого-либо внешнего источника. Было установлено, что ХМ образуют полезную систему функций для разложения токов и полей рассеяния или излучения объектом без потерь при гармоническом возбуждении. В частности, они ортогональны как на поверхности объекта, так и на бесконечной сфере. Важно, что их математические свойства могут быть интерпретированы физически в терминах излученной и накопленной энергии. Фундаментальные свойства ХМ были сформулированы Гарбачем и Ньюманом в работе [32]. Более удобная форма представления ХМ была предложена в работах Харрингтона [33, 34] при развитии метода моментов (ММ).

Наиболее просто концепция ХМ иллюстрируется при рассмотрении задачи о возбуждении произвольного идеально проводящего объекта заданным падающим (первичным) полем. Известно [22, 35], что подобные задачи можно рассматривать с помощью интегрального уравнения электрического поля относительно распределения поверхностной плотности электрического тока $\mathbf{J}(\mathbf{r})$ по объекту

$$-\mathbf{E}_{\text{tan}}^s(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_{\text{tan}}^i(\mathbf{r}), \quad \mathbf{r} \in S, \quad (1)$$

где подстрочный индекс «tan» обозначает тангенциальные компоненты падающего $\mathbf{E}^i$ и рассеянного (вторичного) $\mathbf{E}^s$ полей на поверхности S объекта, и

$$\mathbf{E}^s(\mathbf{r}) = jk\eta \left(\int_S \mathbf{J}(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dS' + \frac{1}{k^2} \nabla \int_S \nabla' \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dS' \right). \quad (2)$$

Здесь $k = \omega \sqrt{\varepsilon \mu}$ и $\eta = \sqrt{\mu / \varepsilon}$ – волновое число и волновое сопротивление свободного пространства; ε и μ – абсолютные диэлектрическая и магнитные проницаемости; $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ – функция Грина

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{e^{-jkR}}{4\pi R}, \quad (3)$$

где $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ определяет расстояние между точкой источника $\mathbf{r}'$ и точкой наблюдения $\mathbf{r}$.

При решении уравнения (1) методом моментов искомая поверхностная плотность тока $\mathbf{J}(\mathbf{r}')$ раскладывается в ряд, как правило, по векторным базисным функциям $\mathbf{f}_p(\mathbf{r}')$, предложенным в [35]

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}') \approx \sum_{p=1}^N I_p \mathbf{f}_p(\mathbf{r}') \quad (4)$$

и применяется процедура тестирования Галеркина.

В результате интегральный импедансный оператор в (1) оказывается представленным через импедансную матрицу $\mathbf{Z} = \mathbf{R} + j\mathbf{X} = [\mathbf{Z}_{pq}] \in \mathbb{C}^{N \times N}$, где $\mathbf{R}$ – резистивная матрица, а $\mathbf{X}$ – реактансная матрица. При этом элементы импедансной матрицы достаточно плотно заполняют всю матрицу. Это обстоятельство приводит к необходимости решения матричных уравнений большой размерности и затруднениям при физической интерпретации окончательно полученных результатов.

Ключевая идея ТХМ заключается с математической точки зрения в диагонализации импедансной матрицы. Диагонализация основывается [22, 33] на решении следующей обобщенной спектральной задачи

$$\mathbf{X}\mathbf{J}_n(\mathbf{r}') = \lambda_n \mathbf{R}\mathbf{J}_n(\mathbf{r}'). \quad (5)$$

В результате ее решения находятся собственные числа λ_n и собственные функции $\mathbf{J}_n(\mathbf{r}')$ через которые, в конечном итоге, выражается искомое распределение поверхностной плотности тока на объекте

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}') \approx \sum_{n=1}^N \frac{\langle \mathbf{J}_n, \mathbf{E}_{\tan}^i \rangle}{1 + j\lambda_n} \mathbf{J}_n(\mathbf{r}'). \quad (6)$$

Внутреннее произведение $V_n^i = \langle \mathbf{J}_n, \mathbf{E}_{\tan}^i \rangle$ в соотношении (6) называется модальным коэффициентом возбуждения моды [22, 23]. Его значение пропорционально степени связи между n -ой модой и внешним падающим полем. Этот уровень связи зависит от положения, величины, фазы и поляризации внешнего источника возбуждения.

Замечательная особенность разложения (6) заключается в том, что при рассмотрении объектов малых и средних электрических размеров в этом разложении достаточно учесть несколько (порядка пяти, шести) собственных функций (в прикладных задачах их принято называть характеристическими модами). Расчет модовых токов дает дополнительную ценную информацию о конструктивном или деструктивном влиянии отдельных мод на суммарное излучаемое или рассеиваемое поле.

Понятия ХМ тока, диаграмм направленностей этих мод, запасаемых ими энергиях и излучаемых мощностях, добротностях излучения можно найти в [22, 23]. На начальной стадии исследования целесообразно выявить значимые в заданной полосе частот ХМ, определить их резонансные частоты, установить в каких частотных интервалах моды проявляют себя как индуктивные или емкостные.

Основные характеристики антенны наиболее емко можно представить в виде частотных зависимостей характеристических углов значимых мод

$$\alpha_n = 180^\circ - \arctg(\lambda_n) \quad (7)$$

и их модальных значимостей

$$MS_n = \left| \frac{1}{1 + j\lambda_n} \right|. \quad (8)$$

В этой статье мы демонстрируем, как ТХМ может значительно улучшить характеристики согласования и излучения исходной КА.

2. Анализ характеристических мод комбинированной антенны

А. Геометрия комбинированной СШП антенны

Геометрия исходной КА (в дальнейшем КА) и связанная с ней система координат показаны на рис. 1. КА, выбранная в качестве объекта исследования, имеет следующие размеры: длина $L = 16$ см, высота $H = 15$ см и ширина $W = 15$ см (рис. 1). Максимум ее диаграммы направленности близок к направлению оси Z . Толщина алюминиевых пластин, из которых была изготовлена антенна (за исключением задней стенки), составляет 1.7 мм. В экспериментах антенна возбуждалась биполярными импульсами напряжения длительностью 1 нс. Антенна, использованная в исследованиях, конструктивно предназначена быть излучателем в источниках сверхширокополосного излучения. КА близка по своей геометрии к излучателю источника, представленного в [4], и к элементу антенной решетки источника, описанного в [5]. Единственное отличие – это конический переход на радиочастотный разъем N -типа (рис. 1). Модель антенны была создана в среде CST Studio и не имела данного перехода (рис. 2).

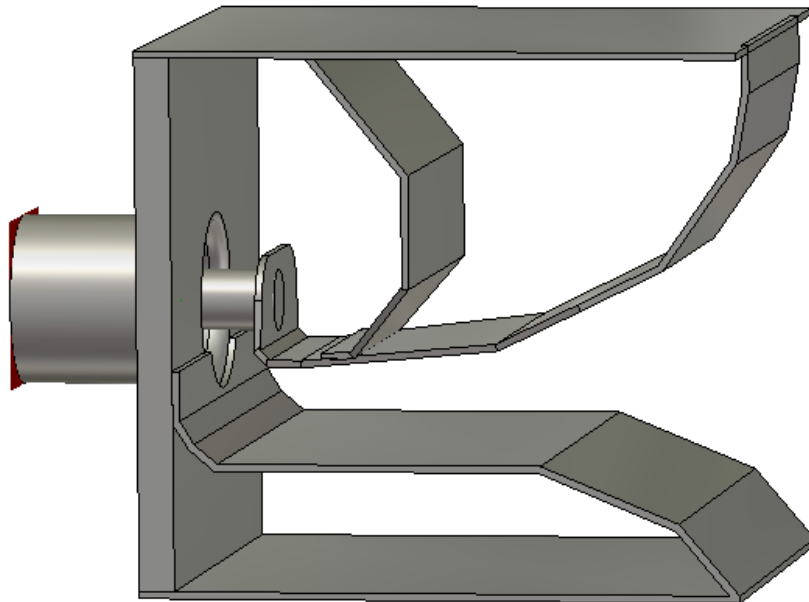


Рис. 2. Модель КА в CST Studio.

Б. Анализ компонентов комбинированной СШП антенны с помощью ТХМ

Для более детального изучения характерных особенностей КА мы последовательно рассмотрели две геометрии, являющиеся компонентами КА: ТЕМ рупор (рис. 3а) и ТЕМ рупор с активным магнитным диполем (рис. 3б).

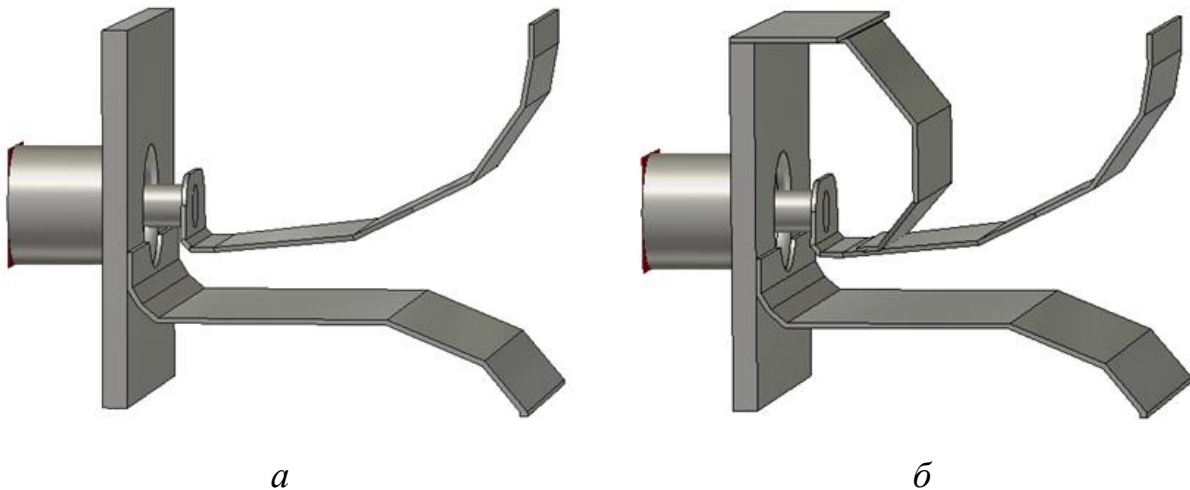


Рис. 3. Компоненты КА: ТЕМ рупор (а) и ТЕМ рупор с активным магнитным диполем (б).

В ходе численного эксперимента были найдены частотные зависимости КСВН и коэффициента усиления в Z-направлении (см. рис. 1) для КА и компонентов КА, показанных на рис. 3а, б. Результаты моделирования представлены на рис. 4а, б.

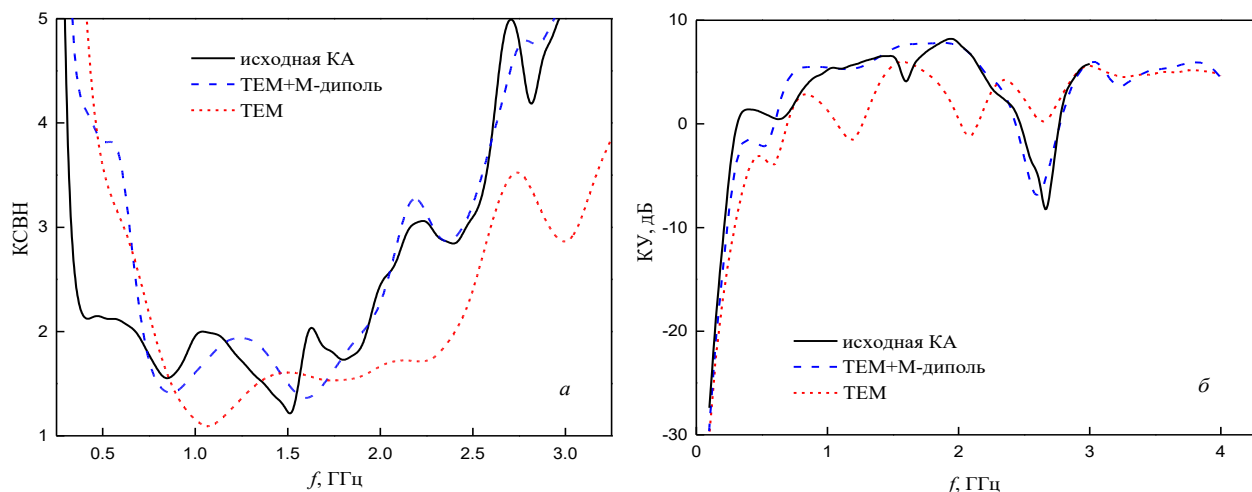


Рис. 4. Частотные зависимости КСВН (а) и КУ (б) компонентов и КА.

Из анализа данных графиков видно, что при сравнимом или даже лучшем согласовании ТЕМ-рупора с фидером в диапазоне частот до 2.3 ГГц, коэффициент усиления ТЕМ-рупора с магнитным диполем выше во всем этом

диапазоне (рис. 4б). Также можно отметить, что сдвиг рабочего диапазона в область нижних частот для КА еще существеннее (рис. 4).

Установив далее, что основными характеристическими модами компонентов КА (рис. 3а, 3б) являются восемь мод, и проведя подробный анализ частотных зависимостей их характеристических углов и модальных значимостей, мы выяснили, что доминирующей модой является восьмая мода. Особенностью этой моды является то, что ее резонансная частота 1.202 ГГц для структуры 3а довольно близка к резонансной частоте 1.216 ГГц для структуры 3б. Распределения поверхностных плотностей токов восьмой моды на указанных структурах на резонансных частотах показаны на рис. 5а, б.

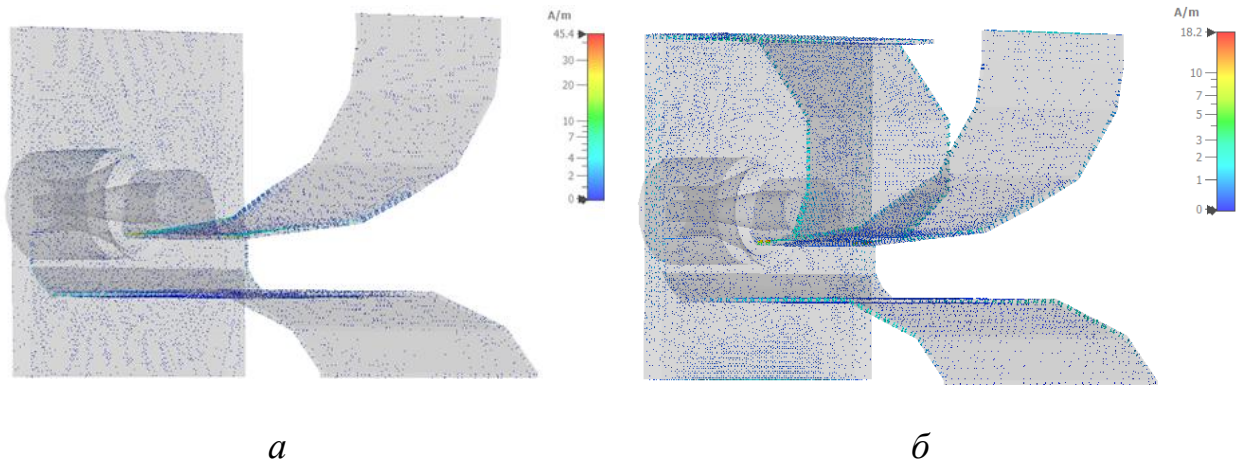


Рис. 5. Распределение поверхностных плотностей токов восьмой ХМ компонентов КА: ТЕМ-рупора (1.201 ГГц) (а) и ТЕМ-рупора с активным магнитным диполем (1.216 ГГц) (б).

Как можно видеть, максимальная плотность токов на ТЕМ-рупоре (рис. 5а) локализована в окрестности его начальной области. Добавление активного магнитного диполя (рис. 5б) приводит не только к появлению поверхностных токов на нем, но и к более равномерному распределению токов по самому ТЕМ-рупору. Результат изменения распределения поверхностных токов виден на диаграммах направленности (ДН) конструкций на данных резонансных частотах (рис. 6а, б).

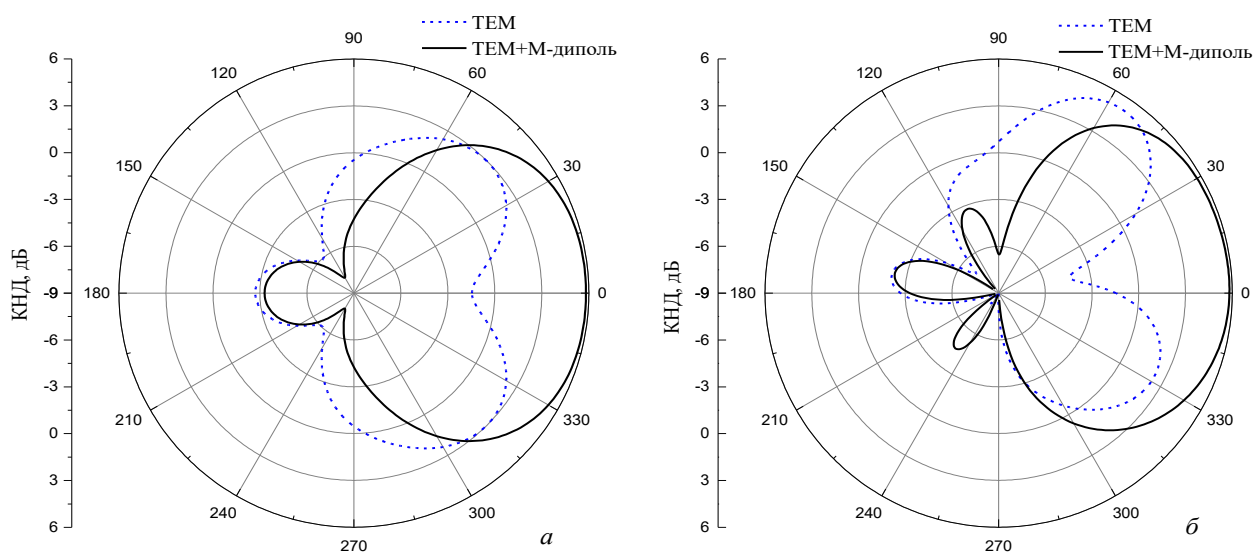


Рис. 6. ДН компонентов КА на резонансных частотах 1.202 ГГц (ТЕМ-рупор) и 1.216 ГГц (ТЕМ-рупор с активным магнитным диполем) в Н-плоскости (а), Е-плоскости (б).

В. Анализ комбинированной СШП антенны с помощью ТХМ

Как уже говорилось во Введении, коаксиально-полосковый переход на входе КА не является оптимальным с точки зрения согласования антенны с фидерным трактом. В тоже время, данный элемент конструктивно прост, верхний электрод ТЕМ-рупора и верхняя пластина антенны изготавливаются путем изгибания единой алюминиевой пластины. Это позволяет получить хорошую повторяемость геометрий КА и изготавливать нужное количество антенн для антенной решетки без существенных затрат. Кроме того, данная конструкция обладает высокой электрической прочностью.

Анализ ХМ КА проводился в полосе частот 0.25-3.0 ГГц. Для данной задачи достаточно первых восьми характеристических мод, чтобы описать характерные признаки поведения антенны в частотной области. Все остальные моды можно рассматривать как моды высших порядков, которые на практике не возбуждаются эффективно, поскольку не резонируют в рассматриваемой полосе частот.

Частотные зависимости характеристических углов этих мод показаны на рис. 7. Моды 2, 3, 6, 8 являются резонансными на частотах 0.516, 0.894, 1.08 и 1.27 ГГц соответственно. Моды 4, 5 и 7 являются нерезонансными

и индуктивными. Мода 1 имеет очень сильный резонанс вблизи частоты 0.213 ГГц, которая находится за пределами полосы согласования КА, и является индуктивной во всей полосе частот 0.25–3.0 ГГц.

На рис. 8 показаны частотные зависимости модальных значимостей всех восьми мод. Они имеют максимальные значения для мод 2, 3, 6, 8, поскольку только данные моды резонируют в рассматриваемой полосе частот.

Отдельный интерес представляло изучение особенностей в распределении поверхностной плотности тока наиболее значимых мод. Так на рис. 9 показано такое распределение для третьей моды на ее резонансной частоте 0.894 ГГц. Видно, что на краях верхнего лепестка ТЕМ-рупора, вблизи области входа, имеет место существенное увеличение плотности тока. Похожая картина наблюдалась и для шестой моды. Для уменьшения плотности тока в окрестности области входа мы несколько изменили геометрию верхнего лепестка ТЕМ-рупора. К лепестку, с двух сторон, добавили полудиски того же материала и толщины (рис. 10). Влияние радиуса R полудиска и расстояния l между центрами этих полудисков было исследовано в численном эксперименте. В результате моделирования была выбрана геометрия с $l = 76$ мм и $R = 16$ мм. Далее в тексте модифицированную указанным образом КА будем обозначать как КАМ.

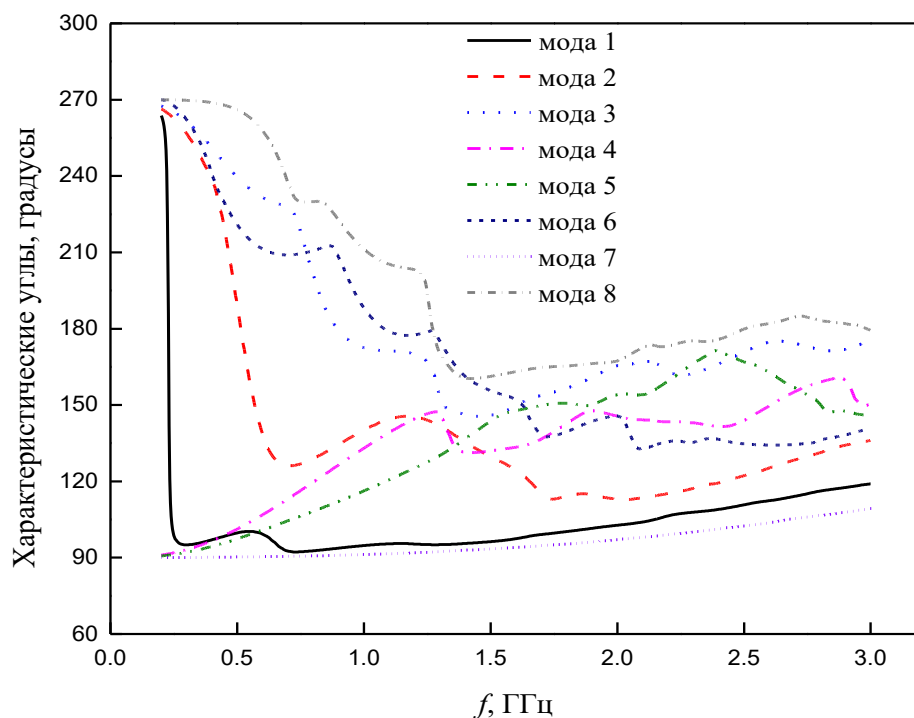


Рис. 7. Частотные зависимости характеристических углов мод 1–8.

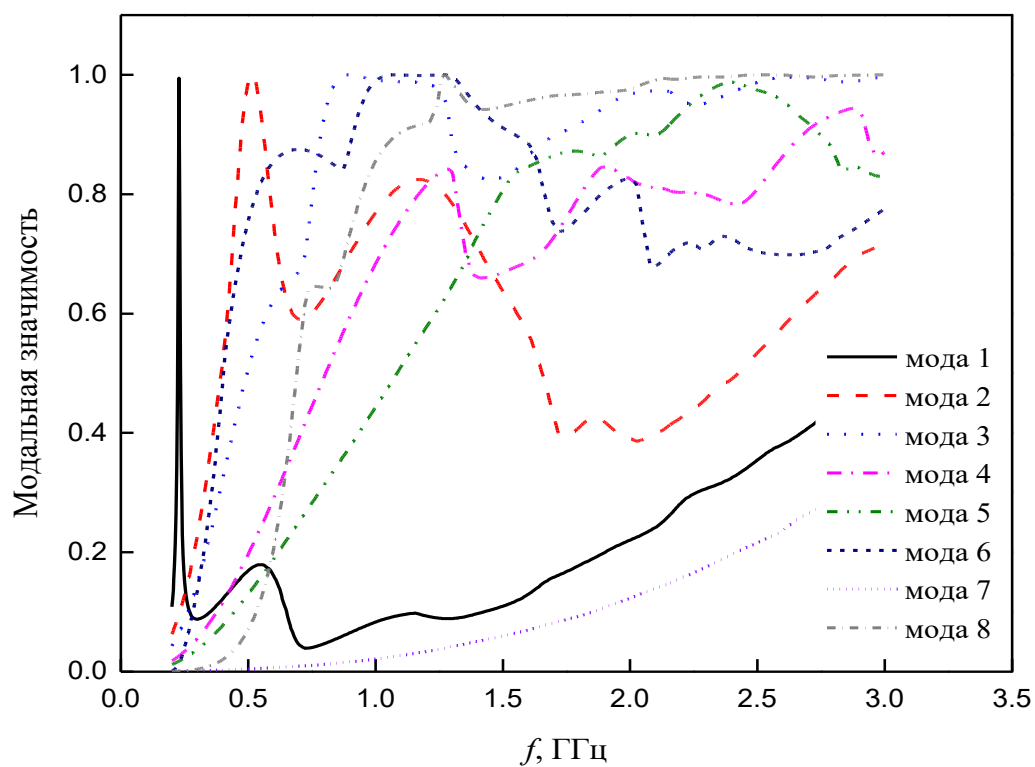


Рис. 8. Частотные зависимости модальных значений мод 1–8.

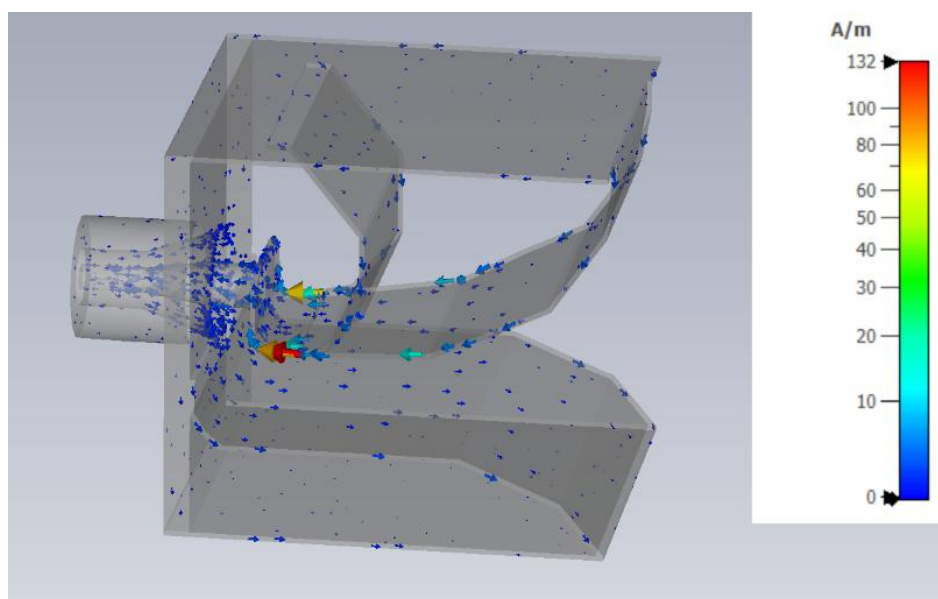


Рис. 9. Распределение поверхностной плотности тока третьей моды КА на частоте 0.894 ГГц.

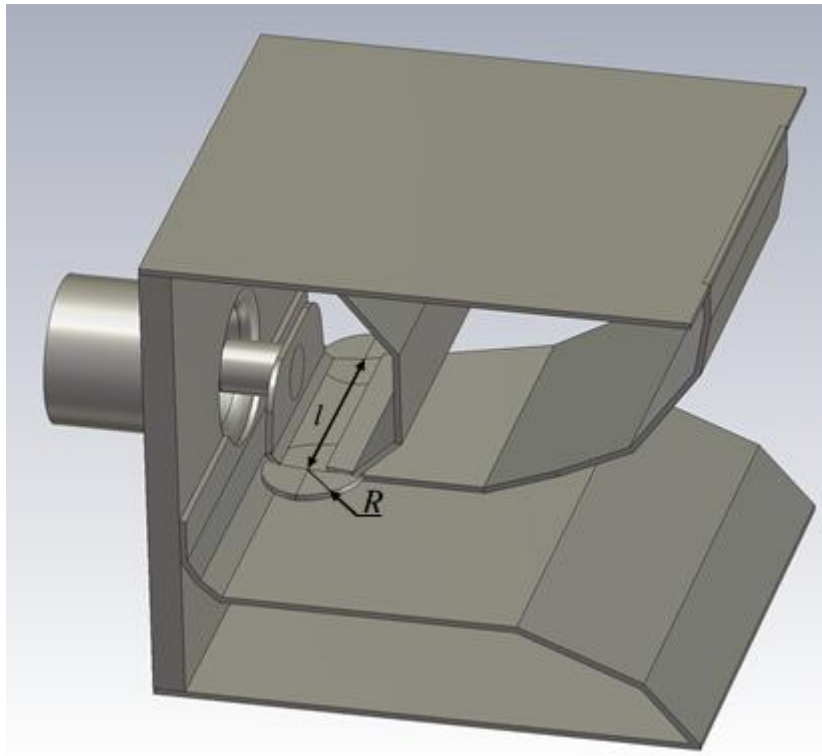


Рис. 10. CST модель КАМ.

3. Результаты измерений

На рис. 11 представлены экспериментальные и расчетные частотные зависимости КСВН для КА и КАМ. Измерения выполнены на векторном анализаторе цепей Agilent PNA N5222A. Как видно из рисунка различия расчетов и измерений для КА имеют место только на частотах $f > 2.7$ ГГц, что связано с отсутствием конического перехода в модели КА. Аналогичные зависимости КСВН КАМ количественно совпадают до частоты 1.7 ГГц, на более высоких частотах есть качественное совпадение. Результатом модификации КА стало лучшее согласование антенны во всей полосе частот и существенное расширение полосы согласования в область высоких частот. Верхняя граничная частота КАМ по уровню КСВН = 2.5 в эксперименте увеличилась с 1.96 ГГц до 2.69 ГГц при практически неизменной нижней частоте 0.36 ГГц и 0.38 ГГц, соответственно.

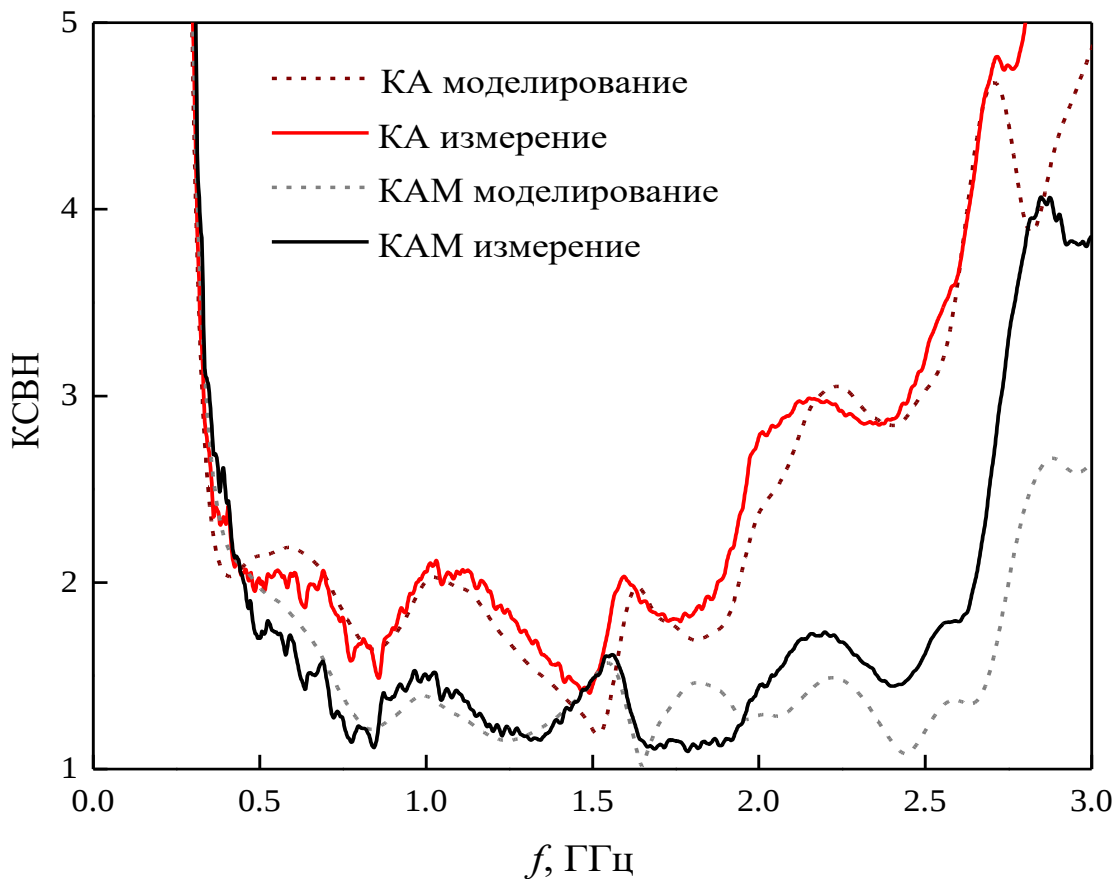


Рис. 11. Экспериментальные и расчетные частотные зависимости КСВН КА и КАМ.

На рис. 12 представлены расчетные нормированные ДН по полю КА и КАМ в E - и H -плоскостях для частот 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 и 3.0 ГГц. Видно, что различия в пространственном распределении излучения антенн становятся заметными на частотах $f \geq 2$ ГГц.

На рис. 13 показан расчетный коэффициент усиления КА и КАМ в Z -направлении. Как видно, коэффициент усиления КАМ выше соответствующего коэффициента усиления КА практически во всей полосе частот. Наибольшее его увеличение происходит в области частот от 1.9 до 2.8 ГГц.

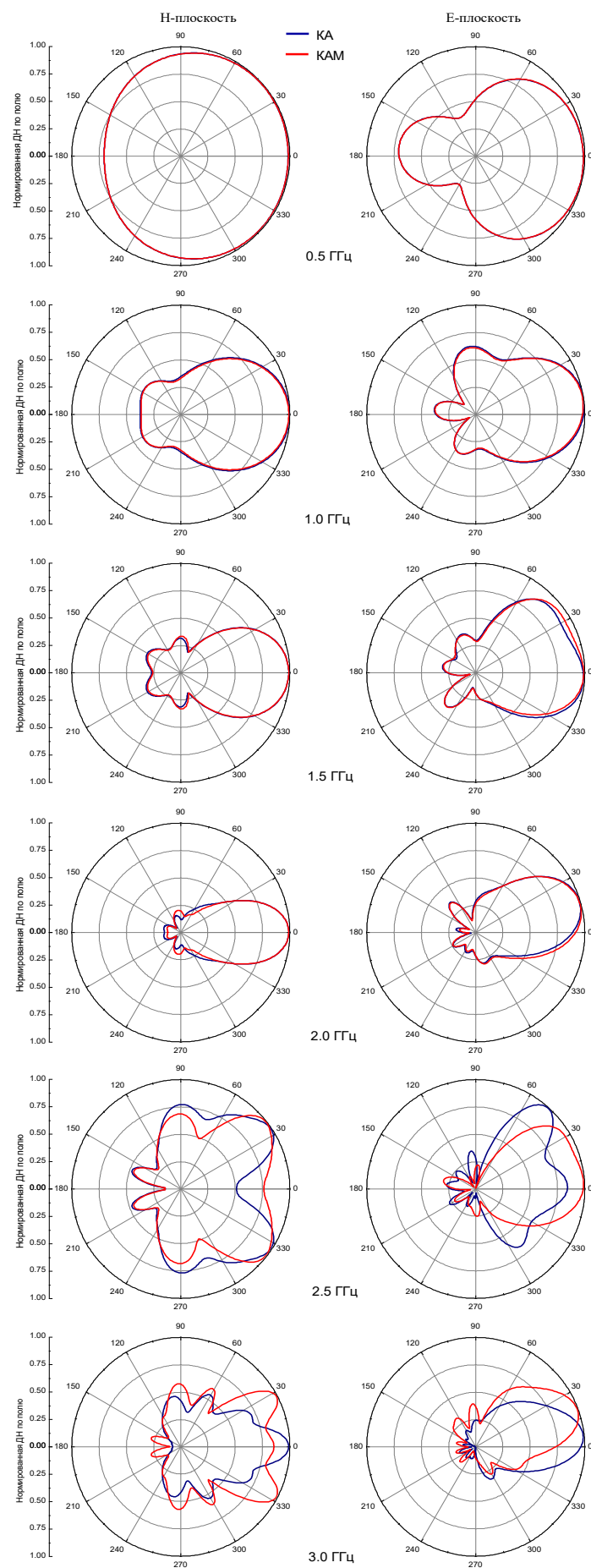


Рис. 12. Расчетные ДН КА и КАМ.

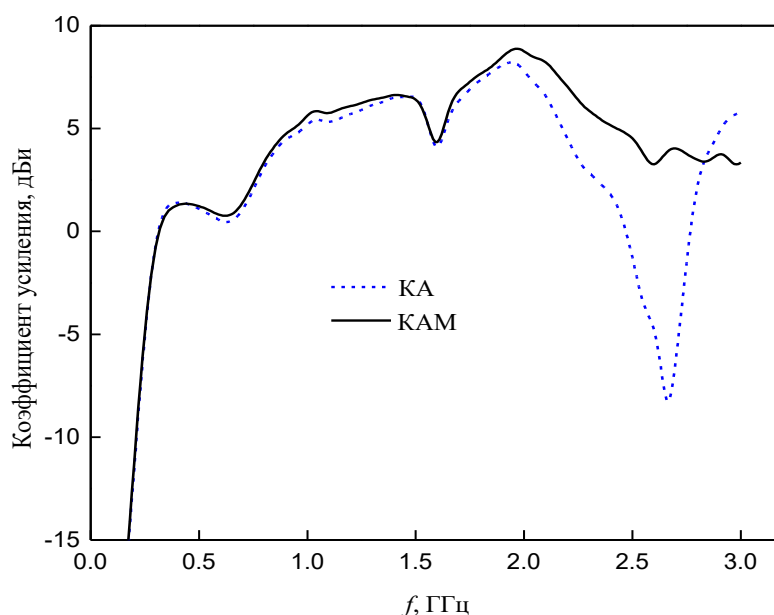


Рис. 13. Частотные зависимости коэффициентов усиления КА и КАМ.

Кроме исследований в частотной области были выполнены исследования во временной области. В данных исследованиях модели антенн и реальные КА и КАМ возбуждались биполярным импульсом напряжения длительностью 1 нс. Осциллограмма биполярного импульса представлена на рис. 14. Измерения проводились в безэховой камере. Приемная антенна в виде половины ТЕМ-рупора устанавливалась на расстоянии 3.24 м от апертуры антенн. Излученный КА импульс $E(t)$ в точке приема в эксперименте и расчете показан на рис. 15. Нормированные излученные КА импульсы $E(t)$ в точке приема в эксперименте и расчете показаны на рис. 15. Видно, что экспериментальные результаты хорошо совпадают с результатами моделирования. На рис. 16 для сравнения представлены полученные в эксперименте импульсы, излученные КА и КАМ. В эксперименте пиковая напряженность поля E_p в излучении КАМ выросла на 9 % по сравнению с E_p в излучении КА. В расчете мы получили увеличение E_p на 11 %. Таким образом, важный параметр СШП антенны – эффективный потенциал излучения rE_p , оказался у КАМ также большим на 9 % (в эксперименте) и на 11 % (в моделировании).

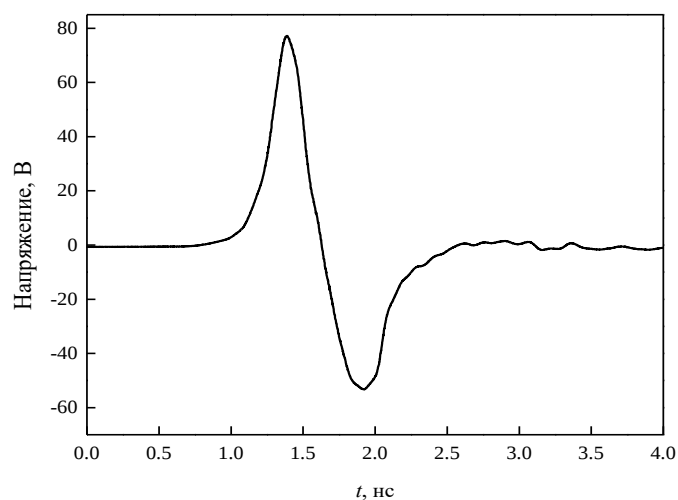


Рис. 14. Осциллограмма возбуждающего импульса напряжения.

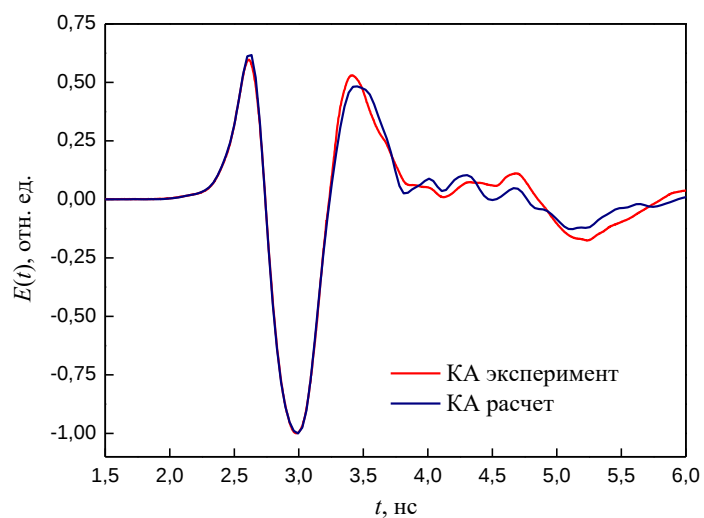


Рис. 15. Нормированные измеренная и расчетная осциллограммы излученного КА импульса на расстоянии 3.24 м.

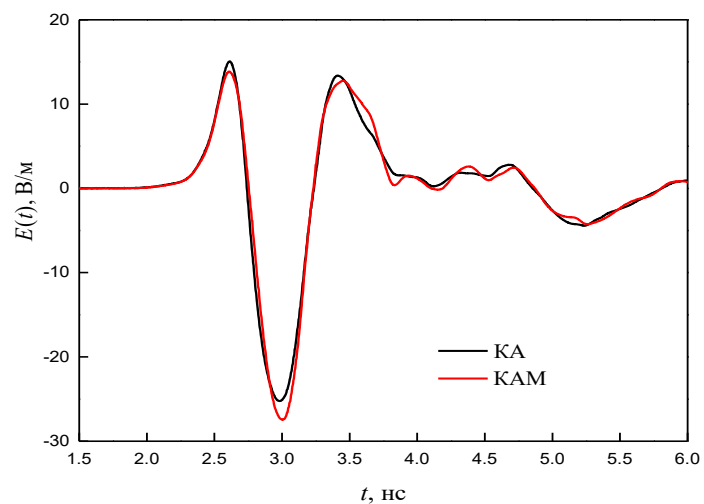


Рис. 16. Измеренные осциллограммы излученных импульсов КА и КАМ на 3.24 м.

Заключение

Обсуждена проблема улучшения характеристик излучения КА антенны. Использована теория характеристических мод для детального исследования характеристических углов, модальных значимостей, распределений токов отдельных мод, возбуждаемых КА антенной. Предложена простая модификация верхнего электрода ТЕМ-рупора КА, чтобы обеспечить желаемую комбинацию вкладов мод в поле излучения в области высоких частот. Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования показали, что модифицированная КА антенна имеет более широкую полосу согласования и улучшенное усиление в полосе частот. Эффективный потенциал излучения rE_p в модифицированной антенне на 9 % (в эксперименте) и на 11 % (в моделировании) превысил соответствующее значение для КА. Продемонстрированные особенности модифицированной КА антенны могут быть полезными при дальнейшем улучшении ее вариантов, предназначенных для излучения СШП электромагнитных импульсов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Ю.И. Буянову и Е.В. Балзовскому за плодотворные дискуссии. Они также благодарят Томский региональный центр коллективного пользования ТНЦ СО РАН, за любезно предоставленный прибор Agilent PNA N522A.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FWRM-2026-0011).

Литература

1. Koshelev V.I. et al. Ultrawideband radiators of high-power pulses // PPPS-2001 Pulsed Power Plasma Science 2001. 28th IEEE International Conference on Plasma Science and 13th IEEE International Pulsed Power Conference. Digest of Papers (Cat. No. 01CH37251). – IEEE, 2001. – Т. 2. – С. 1661-1664.
2. Андреев Ю.А., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. Комбинированная антенна с расширенной полосой пропускания // Радиотехника и электроника. – 2005. – Т. 50. – №. 5. – С. 585-594.
3. Andreev Y.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. – Т. 66. – №. 8. – С. 4269-4276.
4. Andreev Y.A. et al. High-power ultrawideband radiation source // Laser and Particle Beams. – 2003. – Т. 21. – №. 2. – С. 211-217.
5. Efremov A.M. et al. Generation and radiation of ultra-wideband electromagnetic pulses with high stability and effective potential // Laser and Particle Beams. – 2014. – Т. 32. – №. 3. – С. 413-418.
6. Koshelev V.I., Plisko V.V. Structure of arrays of ultrawideband combined antennas // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2017. – Т. 62. – №. 6. – С. 565-568.
7. Qiu Y. et al. A modularized high-power ultra-wideband radiation system based on the space-synthesis method // Review of Scientific Instruments. – 2022. – Т. 93. – №. 4.
8. Koshelev V.I., Belichenko V.P., Buyanov Y.I. Ultrawideband short-pulse radio systems. – Artech House, 2017.
9. Andreev Y.A. et al. Generation and emission of high-power ultrabroadband picosecond pulses // Journal of communications technology and electronics. – 2011. – Т. 56. – №. 12. – С. 1429-1439.
10. Mehrdadian A., Forooraghi K. Design and fabrication of a novel ultrawideband combined antenna // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2014. – Т. 13. – С. 95-98.

11. Kim J.S. et al. A directive subminiature antenna for high-power ultrawideband pulse radiation // IEEE Antennas and wireless propagation letters. – 2014. – Т. 13. – С. 1565-1568.
12. Hyvernaud J. et al. Optoelectronic generation of transient waveforms for UWB radars with rejected frequencies // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. – 2020. – Т. 12. – №. 7. – С. 543-550.
13. Wang S., Xie Y. Design and optimization of high-power UWB combined antenna based on Klopfenstein impedance taper // IEEE transactions on antennas and propagation. – 2017. – Т. 65. – №. 12. – С. 6960-6967.
14. Wang S., Xie Y., Qiu Y. A compact narrow-width combined antenna for the radiation of the UWB electromagnetic pulses // Review of Scientific Instruments. – 2021. – Т. 92. – №. 7.
15. Park H.S. et al. Modified low-frequency compensated TEM (LFCTEM) horn antenna to improve the radiation performance // 2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC). – IEEE, 2013. – С. 1163-1165.
16. Andreev Y.A., Kornienko V.N., Liu S. Optimization of a combined high-power ultrawideband antenna // Journal of communications technology and electronics. – 2017. – Т. 62. – №. 9. – С. 976-983.
17. Elmansouri M., Filipovic D.S. Design of combined-antennas using spherical modes // Proc. Antenna Appl. Symp. – 2014. – С. 167-187.
18. Elmansouri M.A., Filipovic D.S. Miniaturization of TEM horn using spherical modes engineering // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2016. – Т. 64. – №. 12. – С. 5064-5073.
19. Mohamed Ali. Elmansouri, Dejan S. Filipovic. “Combined TEM-horn antenna” Application US 2020/0028268 A1, H01Q 13/02 (2006.01), H01Q 13/08 (2006.01). Published 23.01.2020.
20. Marengo E.A., Ziolkowski R.W. Nonradiating and minimum energy sources and their fields: Generalized source inversion theory and applications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2002. – Т. 48. – №. 10. – С. 1553-1562.

21. Marengo E.A., Devaney A.J., Gruber F.K. Inverse source problem with reactive power constraint // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2004. – Т. 52. – №. 6. – С. 1586-1595.
22. Chen Y., Wang C.F. Characteristic modes: Theory and applications in antenna engineering. – John Wiley & Sons, 2015.
23. Cabedo-Fabres M. et al. The theory of characteristic modes revisited: A contribution to the design of antennas for modern applications // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2007. – Т. 49. – №. 5. – С. 52-68.
24. Vogel M. et al. Characteristic mode analysis: Putting physics back into simulation // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2015. – Т. 57. – №. 2. – С. 307-317.
25. Hansen J.E. (ed.). Spherical near-field antenna measurements. – Iet, 1988. – Т. 26.
26. Kollipara V., Peddakrishna S. Circularly Polarized Antennas Using Characteristic Mode Analysis: A Review // Advances in Technology Innovation. – 2022. – Т. 7. – № 4. – С. 242-257.
27. Elias B.B.Q. et al. A Review of Antenna Analysis Using Characteristic Modes // IEEE Access. – 2021. – Т. 9. – С. 98833 – 98862.
28. Gustafsson M. et al. Unified Theory of Characteristic Modes: Part I – Fundamentals // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2022. – Т. 70. – № 12. – С. 11801-11813.
29. Gustafsson M. et al. Unified theory of characteristic modes – Part I: Fundamentals // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2022. – Т. 70. – №. 12. – С. 11801-11813.
30. Кудин В.П., Фаняев И.А. Метод характеристических мод // Антенны. – 2024. – № 3. – С. 7–20.
31. Garbacz R.J. Modal expansions for resonance scattering phenomena // Proceedings of the IEEE. – 1965. – Т. 53. – №. 8. – С. 856-864.
32. Garbacz R., Newman E. Characteristic modes of a symmetric wire cross // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1980. – Т. 28. – №. 5. – С. 712-715.

33. Harrington R., Mautz J. Theory of characteristic modes for conducting bodies // IEEE transactions on antennas and propagation. – 1971. – Т. 19. – №. 5. – С. 622-628.
34. Harrington R., Mautz J. Computation of characteristic modes for conducting bodies // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 1971. – Т. 19. – №. 5. – С. 629-639.
35. Rao S., Wilton D., Glisson A. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 1982. – Т. 30. – №. 3. – С. 409-418.

Для цитирования:

Андреев Ю.А., Беличенко В.П., Плиско В.В. Модификация комбинированной СШП антенны на основе анализа ее характеристических мод // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.7.1>