

Влияние прямоугольных вставок на характеристики малоэлементных антенных решеток на основе кардиоидных излучателей

Р. Э. Косак, Ю. В. Юханов

*Кафедра антенн и радиопередающих устройств
Южный федеральный университет*

kosak@sfedu.ru, airpu@tgn.sfedu.ru

Аннотация. Рассмотрены конструкции шестнадцати-элементных антенных решеток (АР) на основе кардиоидных излучателей исходной конструкции, а также кардиоидных излучателей с добавлением прямоугольных вставок в виде металлических согласующих пластин на их кромках. Представлены активные коэффициенты стоячей волны по напряжению (КСВН) и коэффициенты усиления (КУ) АР. Определено, что использование кардиоидных излучателей с прямоугольными пластинами позволяет расширить рабочую полосу частот АР и улучшить средний уровень активного КСВН АР. Отключение крайнего ряда излучателей также приводит к расширению рабочей полосы частот. КУ при этом уменьшается не более чем на 1 дБ.

Ключевые слова: антенная решетка; кардиоидный излучатель; КСВН; КУ; печатный излучатель; прямоугольные согласующие вставки; СШП; ШП

I. ВВЕДЕНИЕ

Конструирование АР является актуальным вследствие целого ряда их преимуществ (возможность увеличения КУ, мощности излучения, управления формой диаграммы направленности и направлением главного лепестка [1]), однако требует сложных расчетов и значительных затрат. Для упрощения процесса разработки АР вначале проводится электродинамическое моделирование излучателей АР в составе бесконечных АР в различных САПР. Исследуются их согласование и характеристики излучения [2]. Бесконечные АР представляют собой хорошую приближенную модель для конечных АР больших размеров.

При рассмотрении малоэлементных АР существенное влияние на их характеристики могут оказывать различные вставки, изменяющие конструкцию излучателей. Следующим этапом электродинамического моделирования можно отметить исследование излучателей в составе малоэлементных АР (к примеру, размером 4×4), что позволяет сэкономить вычислительные мощности и время разработки готового решения [3].

В качестве излучателей АР часто используются печатные излучатели с расширяющейся щелью [4] из-за ряда их достоинств: простота изготовления, стоимость материала, планарность, малый вес. Широкое распространение получили печатные излучатели с расширяющейся щелью, в том числе антиподные [5]. В таком варианте исполнения при питании коаксиальным кабелем его жила подключается к лепестку излучателя, расположенному с одной стороны диэлектрической

пластины, а оплетка – к другому, расположенному с противоположной стороны.

Часто к АР предъявляют требования работы в широкой (ШП) или сверхширокой полосе (СШП) частот. В данной работе ШП АР будем считать АР с коэффициентом перекрытия (КП) – отношением верхней рабочей частоты к нижней [1, с. 282] – от 1,1 до 2 [2, с. 58], а СШП – с $\text{КП} \geq 2$ [6, с. 2].

Целью данной работы являлось исследование характеристик малоэлементных АР кардиоидных излучателей исходной конструкции и с прямоугольными согласующими вставками. Расчет проведен в САПР HFSS.

II. ОПИСАНИЕ КАРДИОИДНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

В качестве излучателей АР в данной работе выбраны исходная конструкция печатного кардиоидного излучателя [7] и конструкция печатного кардиоидного излучателя с прямоугольными вставками [8], представленные на рис. 1а,б, соответственно. Раскрыты излучателей выполнены по экспоненциальной форме, а кромки – по кардиоидной форме. В ходе исследований [8] было обнаружено, что прямоугольные вставки размером $25,5 \text{ мм} \times 140,0 \text{ мм}$ позволяют расширить рабочую полосу частот излучателя.

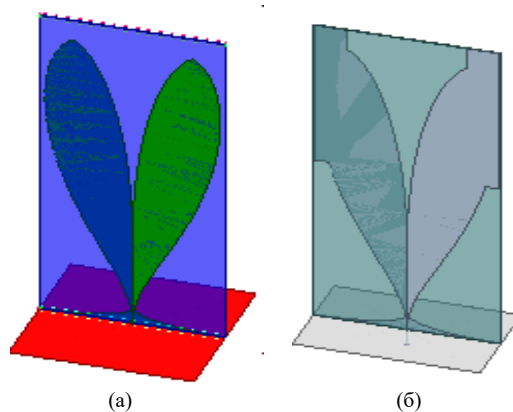


Рис. 1. Исходная конструкция кардиоидного излучателя (а) и с прямоугольными вставками (б)

Представленные излучатели являются антиподными и питаются коаксиальным кабелем. В качестве диэлектрической подложки выбран Rogers RT/Duroid 5880. Кардиоидные излучатели оптимизированы в составе бесконечных АР и являются электрически компактными, СШП, а также способны сканировать в широком секторе углов до $\pm 60^\circ$.

III. МАЛОЭЛЕМЕНТНАЯ АР КАРДИОИДНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ИСХОДНОЙ КОНСТРУКЦИИ И ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

На рис. 2 представлена конструкция шестнадцатиэлементной АР кардиоидных излучателей исходной конструкции. Ее размер составляет 600 мм × 600 мм × 300 мм. Рассмотрим как влияют крайние излучатели 1–4 на характеристики АР.

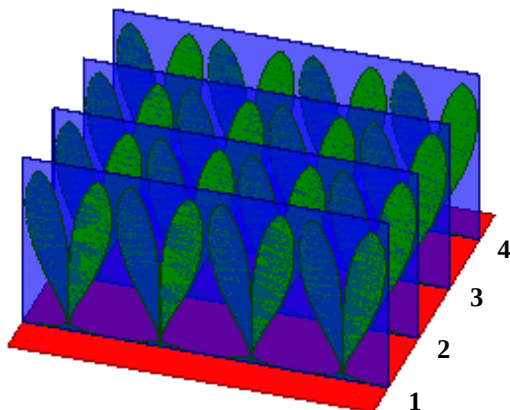


Рис. 2. Малоэлементная АР кардиоидных излучателей исходной конструкции

На рис. 3 и 4 рассмотрены активные КСВН предложенной АР кардиоидных излучателей исходной конструкции при включении всех излучателей и при подключении крайнего ряда излучателей 1–4 на согласованные нагрузки, соответственно. Стрелочками и цифрами обозначены активные КСВН излучателей 1–4. На рис. 5 рассмотрен реализованный КУ при включении всех излучателей (—) и при подключении крайнего ряда излучателей 1–4 на согласованные нагрузки (---).

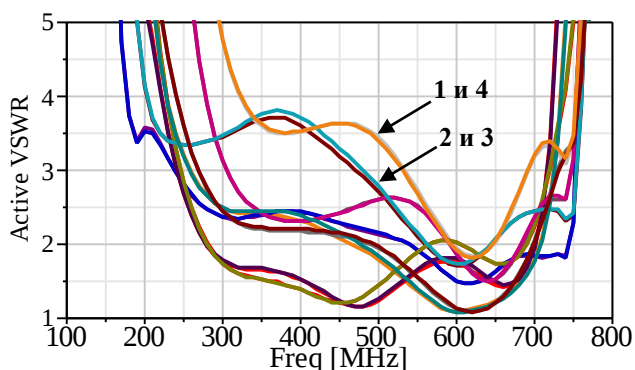


Рис. 3. Частотная характеристика (ЧХ) активного КСВН АР кардиоидных излучателей исходной конструкции при включении всех излучателей

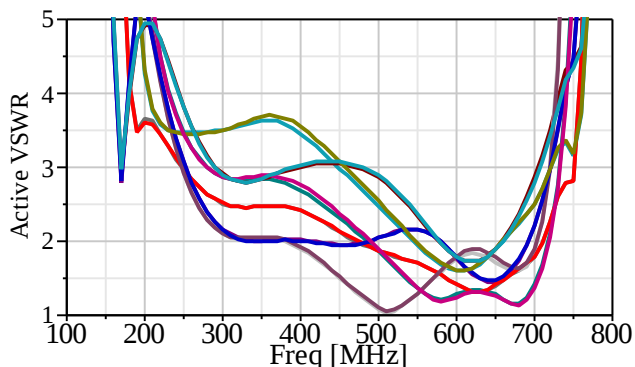


Рис. 4. ЧХ активного КСВН АР кардиоидных излучателей исходной конструкции при подключении излучателей 1–4 на согласованные нагрузки

Согласно рис. 3, рабочая полоса частот АР кардиоидных излучателей исходной конструкции при включении всех излучателей по уровню активного КСВН ≤ 3 располагается от 533,4 до 691,4 МГц. КП $\sim 1,296$, что соответствует ШП. Рабочая полоса частот составляет 158,0 МГц.

Согласно рис. 4, рабочая полоса частот АР кардиоидных излучателей исходной конструкции при подключении излучателей 1–4 на согласованные нагрузки по уровню активного КСВН ≤ 3 располагается от 480,3 до 704,4 МГц. КП $\sim 1,467$, что соответствует ШП. Рабочая полоса частот составляет 226,3 МГц.

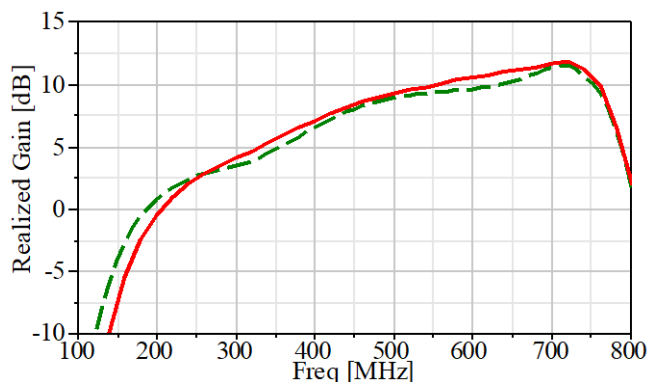


Рис. 5. ЧХ реализованного КУ АР кардиоидных излучателей исходной конструкции при включении всех излучателей (—) и при подключении излучателей 1–4 на согласованные нагрузки (---)

Реализованный КУ в рабочей полосе частот располагается от 9,6 до 11,5 дБ. При подключении излучателей 1–4 на согласованные нагрузки КУ уменьшается не более чем на 1 дБ, согласно рис. 5.

IV. МАЛОЭЛЕМЕНТНАЯ АР КАРДИОИДНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ВСТАВКАМИ И ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

На рис. 6 рассмотрена конструкция шестнадцатиэлементной АР кардиоидных излучателей с прямоугольными вставками. Размер и параметры излучателей остались неизменными, добавились лишь прямоугольные вставки на их краях.

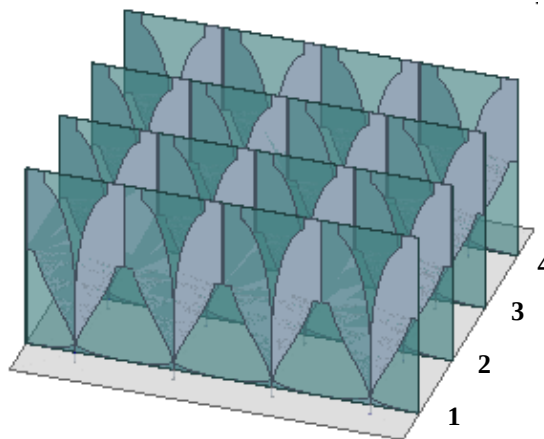


Рис. 6. Малоэлементная АР кардиоидных излучателей с прямоугольными вставками

На рис. 7 и 8 рассмотрены активные КСВН предложенной АР кардиоидных излучателей с прямоугольными вставками при включении всех излучателей и при подключении крайнего ряда излучателей 1–4 на согласованные нагрузки,

соответственно. Стрелочками и цифрами обозначены активные КСВН излучателей 1–4. На рис. 9 рассмотрен реализованный КУ при включении всех излучателей (—) и при подключении крайнего ряда излучателей 1–4 на согласованные нагрузки (---).

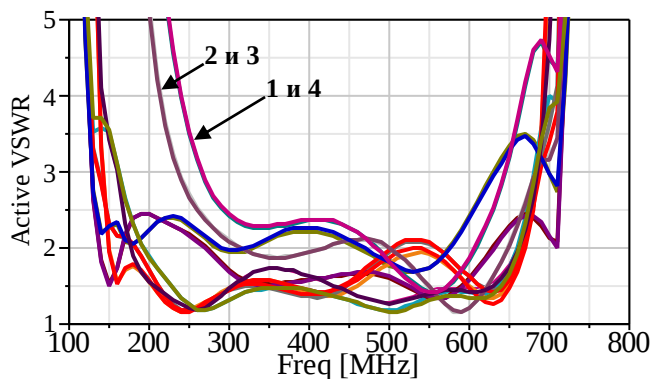


Рис. 7. ЧХ активного КСВН АР кардиоидных излучателей с прямоугольными вставками при включении всех излучателей

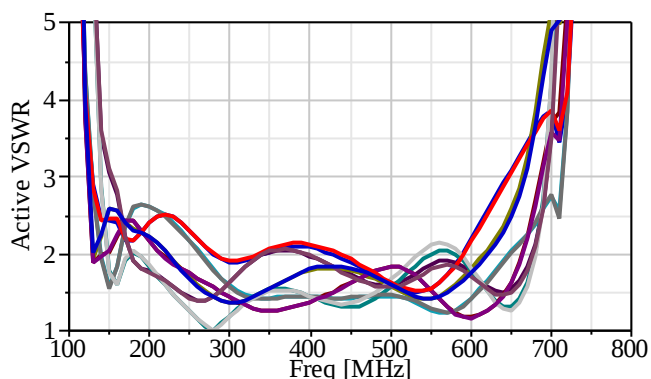


Рис. 8. ЧХ активного КСВН АР кардиоидных излучателей с прямоугольными вставками при подключении излучателей 1–4 на согласованные нагрузки

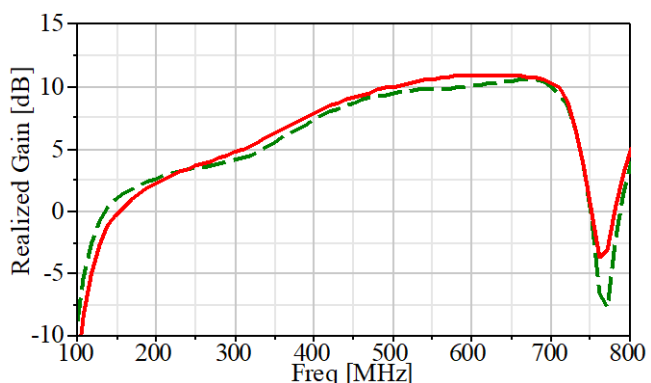


Рис. 9. ЧХ реализованного КУ АР кардиоидных излучателей с прямоугольными вставками при включении всех излучателей (—) и при подключении излучателей 1–4 на согласованные нагрузки (---)

Согласно рис. 7, рабочая полоса частот АР кардиоидных излучателей с прямоугольными вставками при включении всех излучателей по уровню активного КСВН ≤ 3 располагается от 267,2 до 630,3 МГц. КП $\sim 2,359$, что соответствует СШП. Рабочая полоса частот составляет 363,1 МГц.

Согласно рис. 8, рабочая полоса частот АР кардиоидных излучателей с прямоугольными вставками при подключении излучателей 1–4 на согласованные нагрузки по уровню активного КСВН ≤ 3 располагается

от 155,3 до 644,9 МГц. КП $\sim 4,153$, что соответствует СШП. Рабочая полоса частот составляет 489,6 МГц. Как видно, КП при подключении излучателей 1–4 на согласованные нагрузки возрастает на 1,794.

Реализованный КУ в рабочей полосе частот при включении всех излучателей располагается от 4,0 до 10,9 дБ. При подключении излучателей 1–4 на согласованные нагрузки КУ уменьшается не более чем на 1 дБ, как видно из рис. 9.

Электрический размер АР кардиоидных излучателей с прямоугольными вставками при включении всех излучателей на верхней рабочей частоте 630,3 МГц составляет $1,261 \lambda \times 1,261 \lambda \times 0,630 \lambda$.

V. Выводы

Результаты исследования показывают, что прямоугольные вставки позволяют значительно расширить рабочую полосу частот АР в основном из-за смещения нижней рабочей частоты на 111,9 МГц, а также улучшить согласование решетки. Средний уровень активного КСВН АР излучателей с прямоугольными вставками располагается ниже уровня активного КСВН = 2,5. При этом, излучатель в составе бесконечной АР благодаря использованию кардиоидной формы построения внешних краёв металлических слоёв с присоединенными к ним прямоугольными вставками, позволяет добиться КП $\sim 5,814$ в рабочей полосе частот от 127,2 до 739,2 МГц по уровню КСВН ≤ 3 . Итак, характеристики малоэлементной АР и излучателя в составе бесконечной АР похожи.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено в Центре коллективного пользования «Прикладная электродинамика и антенные измерения» Южного федерального университета, г. Таганрог.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Зырянов Ю.Т., Федюнин П.А., Белоусов О.А., Рябов А.В., Головченко Е.В. Антенны. 5-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2022. 412 с.
- [2] Воскресенский Д.И., Степаненко В.И., Филиппов В.С. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток. 3-е изд. Москва: Радиотехника, 2003. 632 с.
- [3] N. Amitay, V. Galindo, Ch.P. Wu Theory and analysis of phased array antennas. Chichester (UK), John Wiley & Sons, 1972. 480 p.
- [4] P.J. Gibson, "The Vivaldi aerial," in *Proc. 9th Eur. Microw. Conf.*, 1979, pp. 101–105, DOI: 10.1109/EUMA.1979.332681.
- [5] A.S. Dixit and S. Kumar, "A survey of perform. enhancement techn. of antipodal Vivaldi antenna," in *IEEE Access*, vol. 8, 2020, pp. 45774–45796, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2977167.
- [6] Чубинский Н.П., Кирьяшкин В.В., Хи Н.К. Об использовании сверхширокополосных сигналов для идентификации радиолокационных объектов // Журнал радиоэлектроники. 2010. № 5. с. 2.
- [7] R.E. Kosak and A.V. Gevorgyan, "Compact Ultra-Wideband Cardioid-Shaped Vivaldi Radiator with H-Shaped Impedance Inserts in the Aperture," *2024 IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC)*, Moscow, Russian Federation, 2024, pp. 330–334, DOI: 10.1109/RMC62880.2024.10846865.
- [8] Патент РФ 231877. Компактный сверхширокополосный излучатель Вивальди кардиоидной формы с прямоугольными вставками / Р.Э. Косак, А.В. Геворкян. Заявл. 04.12.2024. Опубл. 14.02.2025.