УДК 621.396.67

Исследование влияния КПРР на характеристики фрактальной антенны с интегрированным в подложку волноводом

Ю.С. Тихонов, А.Ю. Мирошниченко, Н.А. Акафьева, А.Д. Исаев

Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина

Аннотация: представлены результаты исследования влияния кольцевых планарных разрезных резонаторов (КПРР) на фрактальные антенны с интегрированным в подложку волноводом. Проведён расчёт основных электродинамических параметров антенн. Показана возможность влияния на частотный диапазон антенн с помощью изменения угла поворота КПРР и внутренних радиусов КПРР. Данный тип антенн может найти применение в различных телекоммуникационных приложениях.

Ключевые слова: фрактальная антенна, КПРР, SIW, КСВН, интегрированный в подложку волновод. метаматериал

1. Введение

Из-за быстрого развития телекоммуникационной техники возникает потребность в разработке и исследовании новых типов антенн с хорошими электродинамическими параметрами, малыми габаритами и массой для разных сфер применения [1]. Развитие антенной техники привело к появлению фрактальных антенн. Данные антенн при малых габаритных размерах имеют определённые преимущества, например широкая полоса пропускания, многочастотность, что крайне необходимо в различных системах беспроводной связи [2-3]. Развитие пассивных СВЧ-устройств привело к появлению интегрированных в подложку волноводов (SIW), что позволяет улучшить электродинамические параметры пассивных СВЧ-устройств [4, 5]. Ранее было доложено о применении SIW во фрактальных антеннах [6, 7]. Было отмечено, что при добавлении стержней происходит улучшение КСВН, а также при определённых условиях изменение частоты.

Наряду с этим в последнее время появляется все больше статей, посвященных новому направлению исследований - метаматериалам [8]. Данное направление нашло применение в пассивных СВЧ-устройствах, в приборах вакуумной электроники [9-14]. Это уникальные искусственные структуры, не имеющие аналогов в природе, которые модифицируют диэлектрическую и магнитную проницаемости объектов, которые принимают отрицательные значения. Одним из самых популярных элементов, составляющих метаматериал, являются кольцевые планарные разрезные резонаторы (КПРР). Они находят применение в конструкциях планарных антенн [14].

Целью данной работы являлось оценить влияние КПРР и его угла поворота, размещенного на ранее исследуемой фрактальной антенне с SIW [6, 7], на частотный спектр и электродинамические параметры. Для расчета электродинамических параметров антенн использовался метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в частотной области.

2. Конструкция исследуемой антенны

Конструкция исследуемой фрактальной антенны с SIW и КПРР приведена на рисунке 1. Она состоит из двухсторонней подложки 1, микрополосковой линии 2, конического перехода 3, патча в виде фрактала «Ковёр Серпинского I итерации» 4,

элементов интегрированного в подложку волновода 5, экрана 6 и КПРР элемента 7. Питание антенны производится через микрополосковую линию 2 и конический переход 3, которые в свою очередь образуют переход от квази-ТЕМ моды к ТЕ-моде. Патч 4 электрически соединён с экраном 6 при помощи интегрированного в подложку волновода 5, который выполнен из металлизированных стержней с диаметром стержней d=1 мм и межцентровым расстоянием между стержнями p=2 мм. КПРР элемент расположен с обратной стороны подложки 1. Основные размеры антенны приведены в таблице 1. Геометрические размеры антенны рассчитывались по методике [6].



Рисунок 1. Конструкция фрактальной антенны с SIW и КПРР.

Параметр	Значение	Параметр	Значение	
Подложка	FR-4	L	5 мм	
Диэлектрическая проницаемость	4.4	L _{tap}	10 мм	
Толщина подложки	1,5 мм	R1	(89) мм	
А	90 мм	R2	10 мм	
В	60 мм	R3	(1415) мм	
С	30 мм	R4	16 мм	
W	5 мм	g	(12) мм	
W _{tap}	14 мм	g1	2,5 мм	

Таблица 1. Геометрические размеры фрактальной антенны

3. Результаты исследования антенны

Было проведено теоретическое исследование влияния КПРР его и угла поворота на электродинамические параметры фрактальной антенны с интегрированным в подложку волноводом. На рисунке 2 представлены конструкции антенн: без КПРР; с КПРР, расположенным под углом $\alpha=0^\circ$; с КПРР, расположенным под углом $\alpha=90^\circ$ и с КПРР, расположенным под углом $\alpha=180^\circ$. Расчёты проводились в частотном диапазоне от 0,5 до 5 ГГц, результаты расчёта приведены на рисунках 3-4 и в таблице 2.



Рисунок 2. Вид исследуемых моделей антенн со стороны подложки: а - без КПРР; б - с КПРР, расположенным под углом $\alpha=0^{\circ}$; в - с КПРР, расположенным под углом $\alpha=90^{\circ}$; г - с КПРР, расположенным под углом $\alpha=180^{\circ}$.

Фрактальная	Резонансная частота,	Обратные потери	ИСДИ
антенна	ГГц	S11 , дБ	ксвп
Без КПРР	2,01	19,22	1,24
	2,46	12,43	1,62
	3,47	16,83	1,33
	4,34	13.68	1,54
С КПРР, α=0° и g=1	2,3	32,98	1,04
	2,48	8,89	2,12
	2,7	24,49	1,12
	3,46	23,55	1,14
	4,14	32,05	1,05
	4,32	30,80	1,05
С КПРР, α=0° и g=1	2,35	14,17	1,48
	2,51	13,40	1,51
	2,7	30,85	1,05
	3,49	20,71	1,2
	4,14	28,34	1,07
	4,31	28,19	1,08
С КПРР, α=90° и g=1	2,97	11,43	1,73
	3,46	22,23	1,16
	4,07	13,04	1,57
	4,60	11,15	1,76
С КПРР, α=180° и g=1	2,3	31,97	1,05
	2,48	8,9	2,11
	2,7	25,24	1,11
	3,46	23,54	1,14
	4,14	27,15	1,09
	4,32	33,14	1,04

Таблица 2. Результаты расчёта антенн

Из представленных результатов (рисунок 3) видно, что, КПРР оказывает существенное влияние на частотные характеристики антенны. Во-первых, при добавлении в конструкцию антенны КПРР появляются новые резонансные частоты и происходит сдвиг первого и второго резонанса вверх по диапазону на 250-300 МГц. Во-вторых, при изменении угла поворота с $\alpha=0^{\circ}$ на $\alpha=90^{\circ}$ происходит подавление резонансных частот до 3 ГГц, имеющиеся частоты в данном диапазоне имеют плохое КСВН и происходит уменьшение общего количества резонансов до четырёх. При этом при изменении угла поворота с $\alpha=0^{\circ}$ на $\alpha=180^{\circ}$ имеются незначительные изменения КСВН. На рисунке 4 приведены результаты исследования изменения внутренних радиусов «R₁», «R₃» и, как следствие, зазора «g» на частотные характеристики

антенны. Видно, что особое влияние изменение внутренних радиусов оказывает на первый резонанс ухудшая обратные потери |S₁₁| в 2,3 раза, при этом происходит улучшение обратных потерь |S₁₁| второго и третьего резонанса в 1,5 раза и 1,25 раза. На остальных частотах изменения электродинамических параметров не существенное.



Рисунок 3. Зависимость обратных потерь |S11| от частоты при изменении угла поворота.



Рисунок 4. Зависимость обратных потерь |S₁₁| от частоты при изменении параметра «g».

На рисунке 5 представлены диаграммы направленности фрактальных антенн с КПРР углом поворота α=0° на α=90° для частоты 3,46 ГГц. Видно, что при изменении угла поворота изменяется и однородность диаграммы, появляются выраженные лепестки и диаграмма приобретает форму близкой к форме «бабочки».



Рисунок 5. Диаграмма направленности на частоте 3,46 ГГц: а - с КПРР, расположенным под углом $\alpha=0^\circ$; б - с КПРР, расположенным под углом $\alpha=90^\circ$.

4. Заключение

Исследовано влияние КПРР с разным углом поворота и разными внутренними радиусами R₁, R₃ на электродинамические параметры антенн. С помощью трехмерного моделирования проведено изучение основных электродинамических параметров в диапазоне до 5 ГГц. Антенна в исследуемом диапазоне обладает многочастотностью. Отмечено влияние угла поворота и внутренних радиусов КПРР на частотный диапазон, что заключалось в изменениях электродинамических параметров антенн. Исследованы диаграммы направленности антенн. Данный тип антенн может найти применение в различных телекоммуникационных приложениях.

Список литературы

- Oraizi H., Hedayati S. Miniaturization of microstrip antennas by the novel application of the Giuseppe Peano fractal geometries // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2012. – T. 60. – №. 8. – C. 3559-3567.
- 2. Yu Z. et al. A novel Koch and Sierpinski combined fractal antenna for 2G/3G/4G/5G/WLAN/navigation applications // Microwave and Optical Technology Letters. 2017. T. 59. №. 9. C. 2147-2155.
- 3. Gupta M., Mathur V. Wheel shaped modified fractal antenna realization for wireless communications //AEU-International Journal of Electronics and Communications. – 2017. – T. 79. – C. 257-266.
- 4. Wu K., Deslandes D., Cassivi Y. The substrate integrated circuits-a new concept for high-frequency electronics and optoelectronics // 6th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service, 2003. TELSIKS 2003. IEEE, 2003. T. 1. C. P-III.
- Rayas-Sanchez J. E., Gutierrez-Ayala V. A general EM-based design procedure for single-layer substrate integrated waveguide interconnects with microstrip transitions //2008 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. – IEEE, 2008. – C. 983-986.
- 6. Тихонов Ю. С. и др. Исследование планарных фрактальных антенн «ковер Серпинского», выполненных по SIW технологии // Сб. докл. XII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». –Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ. 2023. С. 454-458.
- Tikhonov Y. et al. Theoretical and Experimental Research of Fractal Antennas Designed by SIW-Technology // 2024 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). – IEEE, 2024. – T. 1. – C. 65-68.
- 8. Вендик И. Б., Вендик О. Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (Обзор) //Журнал технической физики. 2013. Т. 83. №. 1. С. 3-28.
- Галдецкий А. В., Голованов Н. А. Многолучевые клистроны с радиальным расположением лучей // Электроника и микроэлектроника СВЧ: материалы Всерос. науч.-техн. конф. –СПб. – 2023. – С. 4-9.
- Тихонов Ю. С. и др. Двухзазорный многолучевой резонатор с метаматериалом с возможностью подавления высших мод // Сб. докл. XIII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». –Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ. – 2024. – С. 395-399.
- Tikhonov Y. et al. Klystron Double-Gap Resonator with Integration of CeSRR Elements into the Resonance System //2024 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). – IEEE, 2024. – T. 1. – C. 61-64.
- Wang X. et al. Recent advances in metamaterial klystrons // EPJ Applied Metamaterials. 2021. Iss. 8. P. 9.
- 13. Zhang X. et al. Metamaterial-inspired interaction structure for MW-level klystron at 714 MHz // IEEE Transactions on Electron Devices. 2022. Iss. 69. №. 11. P. 6336-6341.
- da Silva I. B. T. et al. Design of microstrip patch antenna with complementary split ring resonator device for wideband systems application //Microwave and Optical Technology Letters. – 2015. – T. 57. – №. 6. – C. 1326-1330.