

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.4.2>

УДК: 537.86

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВЯЗКИ МЕЖДУ ДВУМЯ ПАТЧ-АНТЕННАМИ С ДЕФОРМИРОВАННЫМ ГРАУНДОМ В ВИДЕ ЩЕЛЕЙ

В.Е. Кутепов, И.В. Пешков

Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина
399770, г. Елец, ул. Коммунаров, 28.

Статья поступила в редакцию 22 января 2026 г.

Аннотация. Проведено исследование разработанных комбинированных структур деформированного граунда в виде щелей между двумя патч-антеннами и их влияния на увеличение антенной развязки. На базе изготовленных экспериментальных образцов проведены измерения коэффициентов отражения и передачи между антеннами (S_{21}) в четырёх вариациях расположения для каждой структуры.

Ключевые слова: деформированный граунд, патч-антенна, коэффициент отражения, коэффициент передачи, взаимное влияние.

Автор для переписки: Кутепов Владислав Евгеньевич, schtuzer88@gmail.com

Введение

Применение структур деформированного граунда (DGS) является наиболее распространённым методом снижения взаимного влияния излучающих элементов антенной решётки [1,2]. Распространённость данного метода обусловлена малыми размерами и простотой реализации в сравнении с большинством других методов (структур электромагнитной запрещённой зоны, резонаторов различных форм, метаматериалов и т.д.).

Целью данной статьи является анализ антенной развязки, обеспечивающейся комбинированными структурами на базе изготовленных экспериментальных образцов в виде двух патч-антенн с DGS в виде щелей в граунде.

1. Конструкции патч-антенн с комбинированными dgs

Геометрия патча показана на рис. 1, с указанными в таблице размерами.

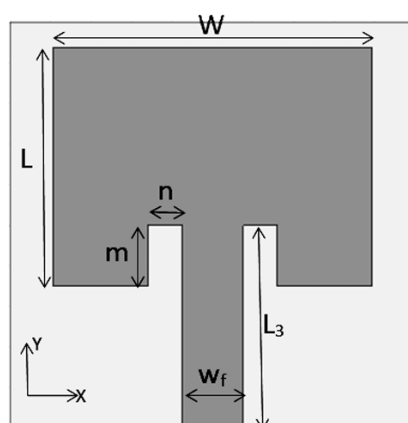


Рис. 1. Схема патч-антенны с обозначениями геометрии.

Таблица 1. Значения размеров патч антенны.

W	L	L3	Wf	m	n
15,74 mm	11,75 mm	10 mm	3 mm	3 mm	1,7 mm

На рисунке 2 показаны модели щелевых структур деформированного граунда.

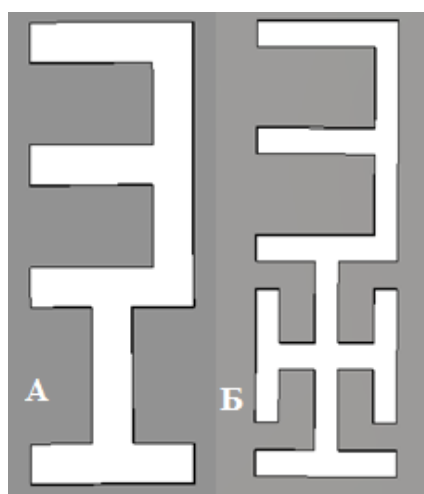


Рис. 1. Комбинированные щелевые DGS в поверхности граунда (в модели).
 А – структура E + H, Б – структура E + H-Inverted H.

В макете используется подложка FSD220G со значением диэлектрической проницаемости равной $2,2 \pm 0,03$ и тангенсом угла потерь равным $0,0008$ на частоте 10 ГГц. В данной работе высота подложки равна 1,6 мм. Для моделируемых и реализованных на практике двухэлементных решёток площадь составляет $22,5 \times 46 \text{ мм}^2$.

Были изготовлены 8 образцов в различных вариациях размещения комбинированных структур (рис. 3,4).

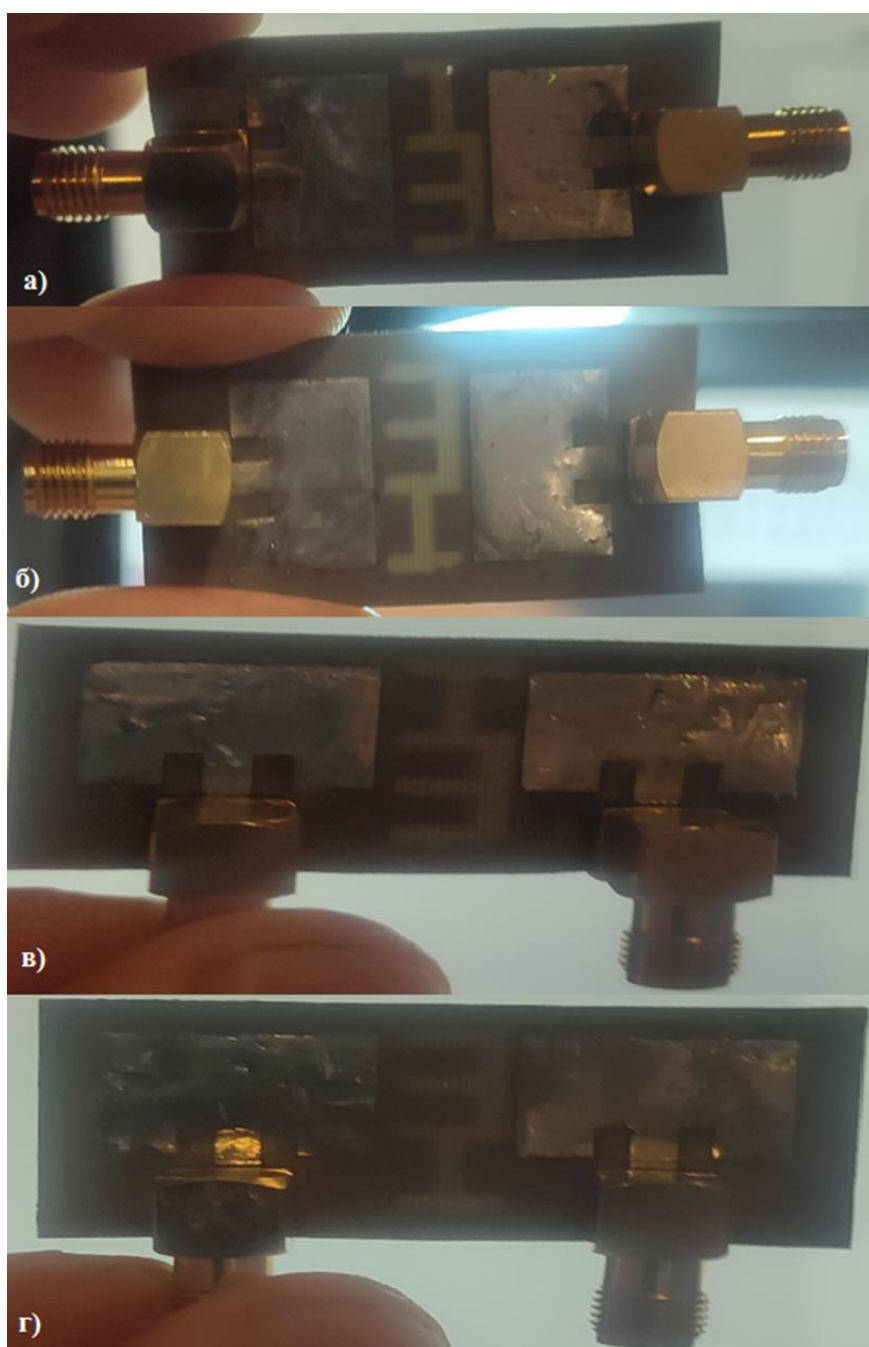


Рис. 3. Образцы патч-антенн с внедрением структур вида А.

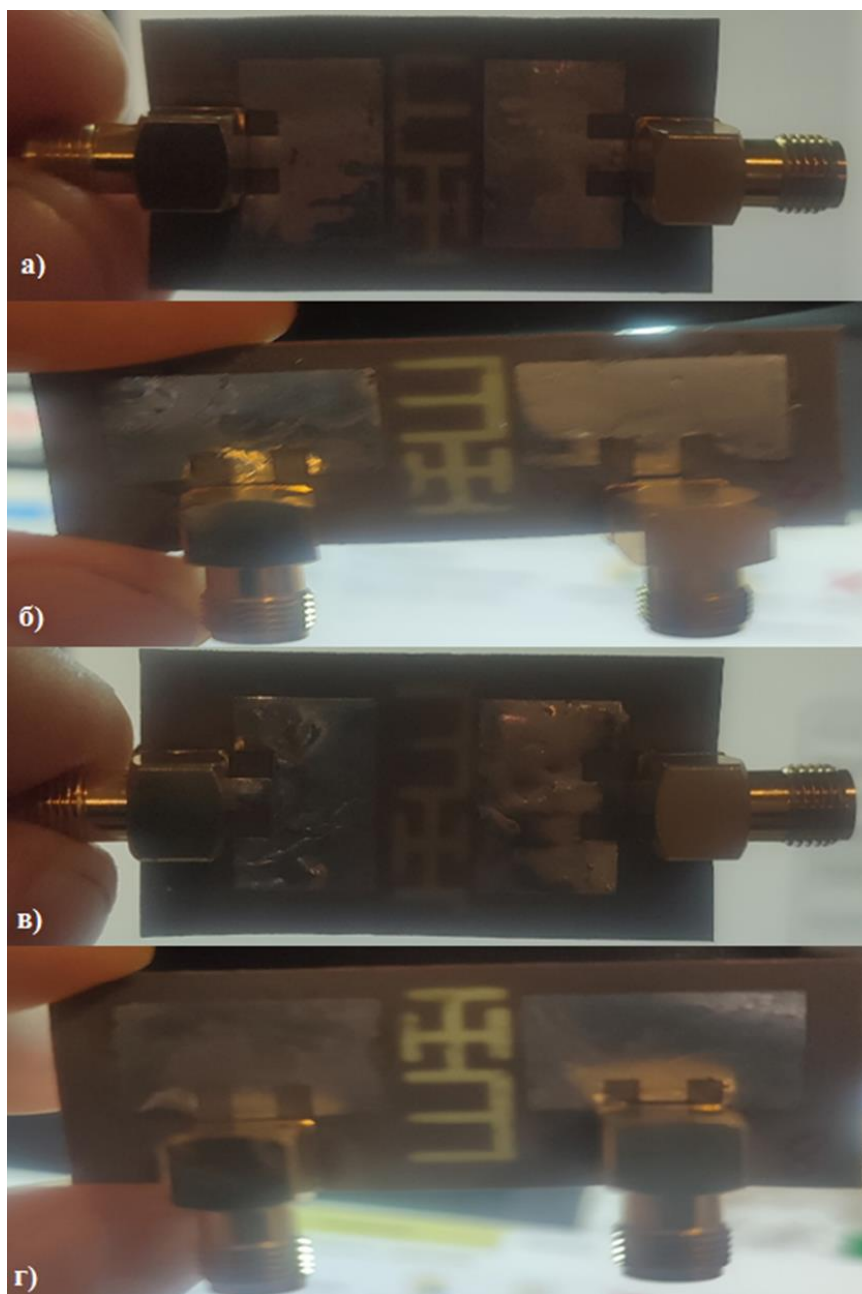


Рис. 4. Образцы патч-антенн с внедрением структур вида Б.

Структуры деформированного граунда (DGS) выполняются в виде щелей на поверхности граунда (на нижней стороне антенны) между излучателями.

Каждый образец включает в себя две патч-антенны с зазорами между неизлучающими краями друг друга, равными 7,86 мм, что соответствует 0,16 длины волны и расстоянию 0,58 длины волны между центральными точками излучателей для частоты 7,35 ГГц [5]. Сопротивление микрополосковой линии передачи составляет 50 Ом.

Для комбинированных структур площадь каждой из них равна не более $17 \text{ мм} \times 6 \text{ мм}$. Ширина вытравленных линий составляет 1,5 мм для структур вида А и 1 мм для структур вида Б.

Изготовление патч-антенн выполнялось посредством вытравки хлорным железом и лазером, минимальный диаметр луча которого составляет 1 мм, покрытия оловом с толщиной слоя от 12 до 15 мкм (при толщине медного покрытия равной 18 мкм) и монтажа SMA разъемов.

2. Анализ характеристик рассматриваемых структур деформированного граунда

По окончании этапов изготовления патч-антенн с внедрением структур деформированного граунда, проведены измерения и качественная оценка характеристик: коэффициента стоящей волны (КСВ), коэффициентов отражения входа антенны (S_{11}), коэффициентов передачи мощности между антеннами (S_{21}), а также их последующий анализ.

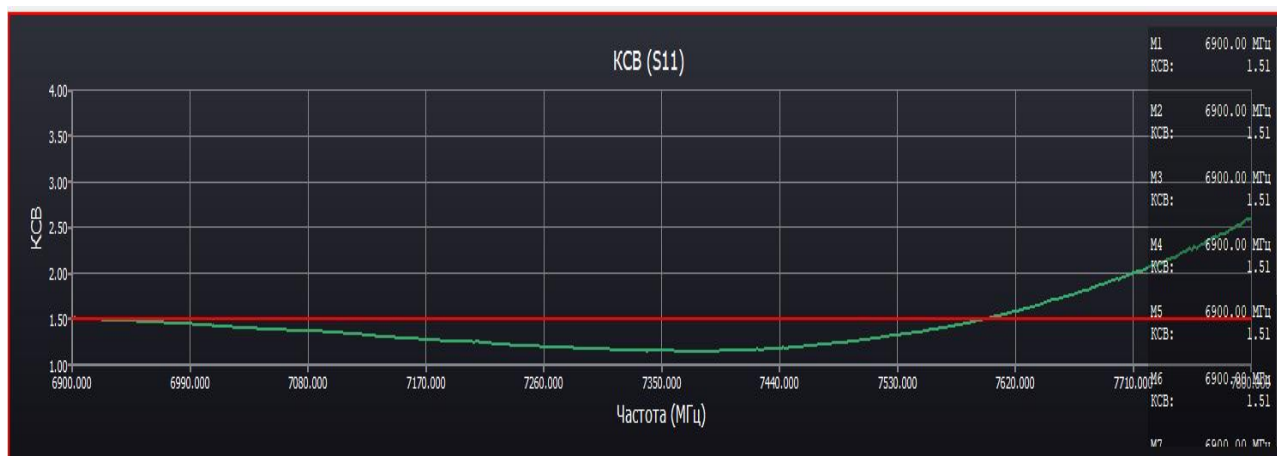


Рис. 5. КСВ патч-антенн.

В результате измерений КСВ для каждого образца получены идентичные друг другу результаты, демонстрирующие значения от 1,1 до 1,5 на ширине полосы от 6,9 ГГц до 7,55 ГГц, достигая наименьших значений на резонансной частоте от 7,26 ГГц до 7,44 ГГц.

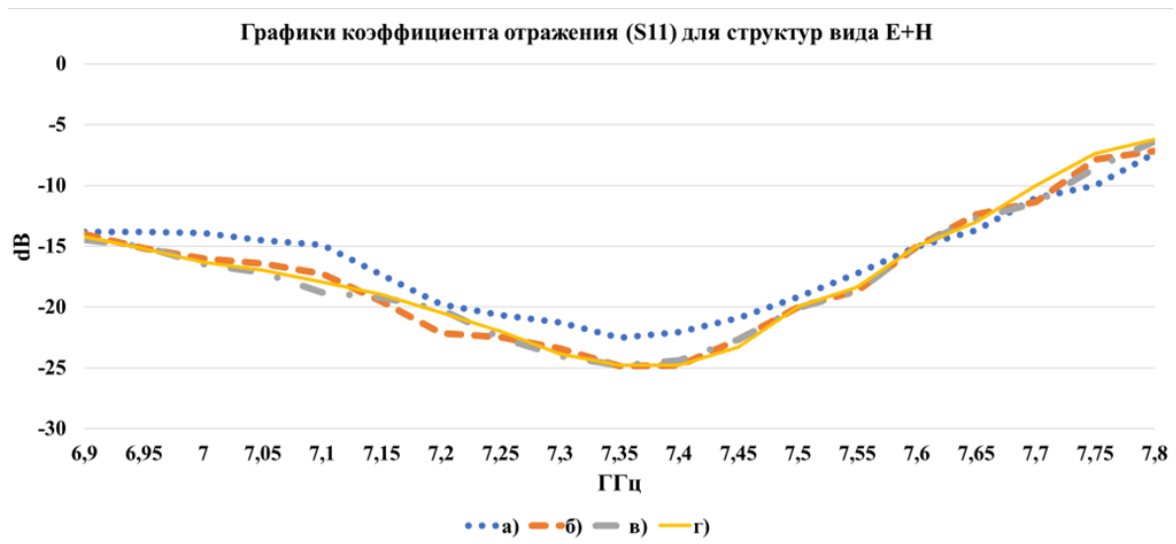


Рис. 6. Параметры частотных зависимостей коэффициентов отражения (S11) с внедрением структуры А.

Графики на рис. 6 соотнесены с вариациями размещения структур (рис. 3) следующим образом: а) синий график, б) оранжевый график, в) серый график и г) жёлтый график.

Значения коэффициентов отражения с внедрением структур А варьируются от $-22,5$ дБ до $-24,8$ дБ на отрезке от $7,26$ ГГц до $7,44$ ГГц.

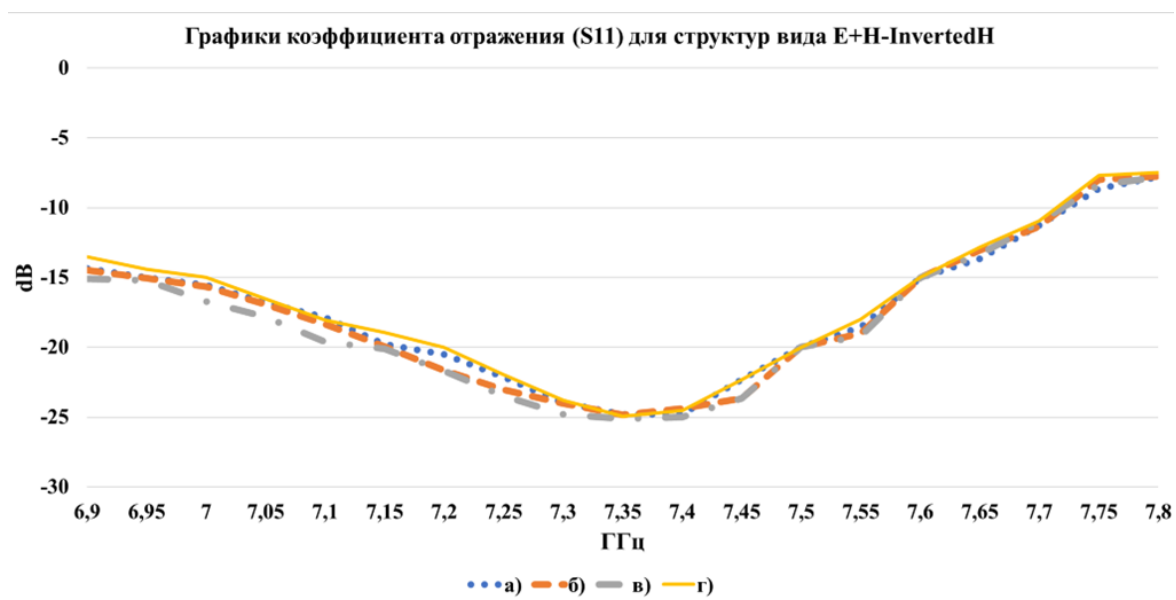


Рис. 7. Графики частотных зависимостей коэффициентов отражения (S11) для патч-антенн с внедрением структуры Б.

На рис. 7 графики соотнесены с вариациями размещения структур (рис. 4) следующим образом: а) синий график, б) оранжевый график, в) серый график и г) жёлтый график.

Для патч-антенн с внедрением структур Б показатели S_{11} составляют в среднем от $-24,8$ дБ до $-25,01$ дБ в диапазоне от $7,26$ ГГц до $7,44$ ГГц.

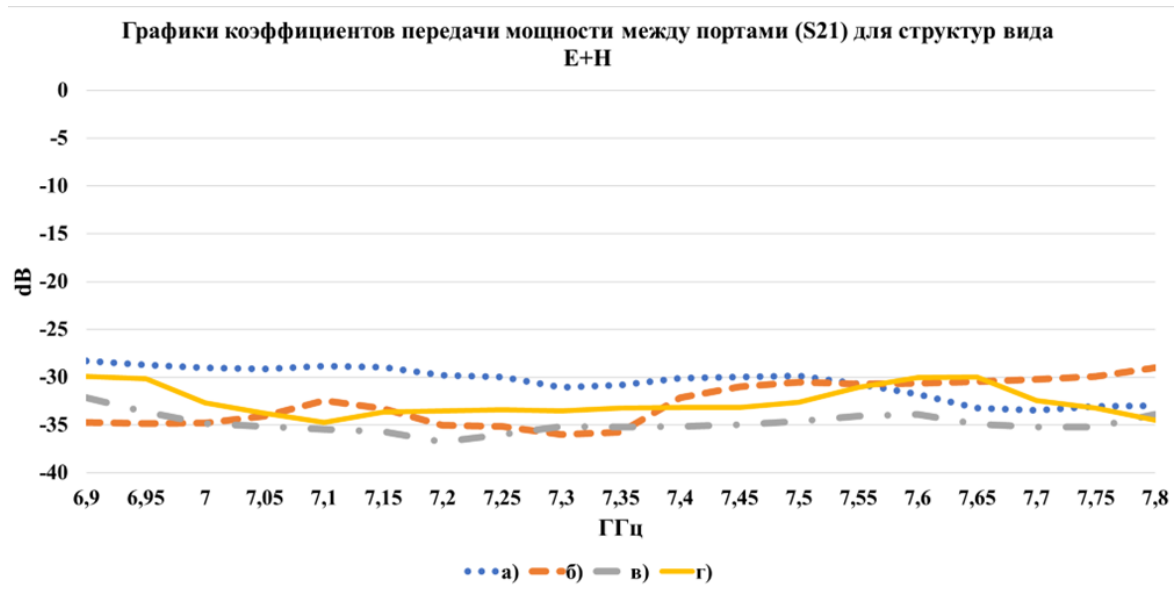


Рис. 8. Параметры частотных зависимостей коэффициентов передачи мощности (S_{21}) между патч-антеннами с внедрением структур А.

Графики на рис. 8 соотнесены с вариациями размещения структур (рис. 3) следующим образом: а) синий график, б) оранжевый график, в) серый график и г) жёлтый график.

Численные значения S_{21} для патч-антенн с внедрением структур А варьируются от $-30,83$ дБ до $-35,21$ дБ на полосе от $7,26$ ГГц до $7,44$ ГГц.

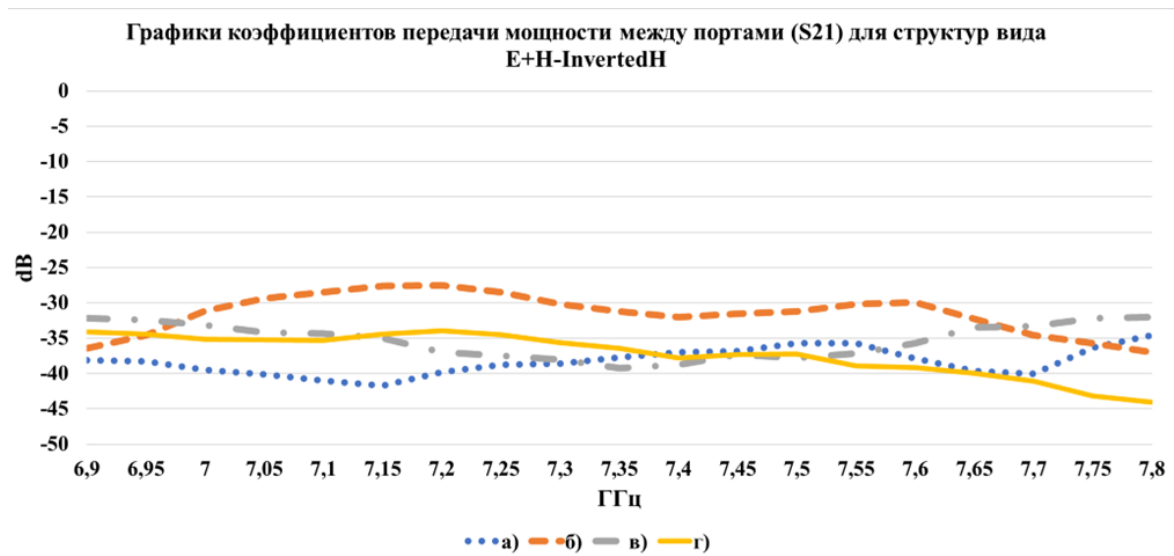


Рис. 9. Параметры частотных зависимостей коэффициентов передачи мощности между патч-антеннами с внедрением структур Б.

На рис. 9 графики соотнесены с вариациями размещения структур (рис.4) следующим образом: а) синий график, б) оранжевый график, в) серый график и г) жёлтый график.

Для патч-антенн с внедрением структур Б показатели зависимостей коэффициентов передачи мощности между портами в среднем составляют от $-31,8$ дБ до $-39,24$ дБ в диапазоне от $7,26$ ГГц до $7,44$ ГГц.

Смещение резонансной частоты в экспериментальных образцах от $7,65$ ГГц к $7,35$ ГГц обусловлено характером подключения SMA портов (сверление материала и пайка на поверхности граунда), а также физическими деформациями материала в результате монтажа.

Заключение

В результате измерений показано, что изготовленные образцы демонстрируют следующие результаты: обеспечение развязки от $-30,83$ дБ до $-35,21$ дБ для антенн со структурами А и от $-31,8$ дБ до $-39,24$ дБ для антенн со структурами Б, коэффициент стоячей волны для каждой антенны $1,1-1,15$, а также коэффициенты отражения входа антенн от $-22,5$ дБ до $-24,8$ дБ для антенн со структурами А и от $-24,8$ дБ до $-25,01$ дБ для антенн со структурами Б на резонансной частоте $7,35$ ГГц с шириной полосы 180 МГц (от $7,26$ ГГц до $7,44$ ГГц).

Литература

1. Kumar A. et al. A review on different techniques of mutual coupling reduction between elements of any MIMO antenna. Part 1: DGSs and parasitic structures //Radio Science. – 2021. – Т. 56. – №. 3. – С. 1-25. <https://doi.org/10.1029/2020RS007122>
2. Ahn D. et al. A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure //IEEE transactions on microwave theory and techniques. – 2001. – Т. 49. – №. 1. – С. 86-93. <https://doi.org/10.1109/22.899965>

3. Kutepov V. E., Peshkov I. V. Modeling and Analysis of Defective Ground Structures Based on a Combination of Unit Cells of Simpler Structures //2025 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – IEEE, 2025. – С. 1-6.
<https://doi.org/10.1109/WECONF65186.2025.11017045>
4. Elsheakh D. N. et al. Low mutual coupling 2×2 microstrip patch array antenna by using novel shapes of defect ground structure //Microwave and Optical Technology Letters. – 2010. – Т. 52. – №. 5. – С. 1208-1215. <https://doi.org/10.1002/mop.25152>

Для цитирования:

Кутепов В.Е., Пешков И.В. Экспериментальное исследование развязки между двумя патч-антеннами с деформированным граундом в виде щелей. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.4.2>