

*С. Т. Турдумаматов*

*Институт автоматики и информационных технологий*

*Национальной академии наук Кыргызской Республики, г.Бишкек*

*samat.turdumamatov@iaau.edu.kg*

## **РАДИОЛОКАЦИОННАЯ МИКРОПОЛОСКОВАЯ АНТЕННА С ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СТРУКТУРОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ**

Печатные микрополосковые антенные решетки широко используются в беспроводной связи. Взаимная связь между элементами антенны влияет на свойства антенны, поэтому уменьшение взаимного влияния и улучшения изоляции являются важными задачами для радиолокационных систем. В статье предложено несколько вариантов компактных электромагнитных структур запрещенной зоны (EBG) на основе метаматериалов. Результаты компьютерного моделирования показали, что изоляция между элементами антенны может быть улучшена с помощью предложенных структур электромагнитных запрещенных зон.

**Ключевые слова:** печатная антенная решетка, электромагнитная структура запрещенной зоны (EBG), метаматериалы, взаимная связь, изоляция, радиолокационная диаграмма.

### **Введение**

Антенна является важным элементом для передачи и приема сигналов. В настоящее время поток передаваемой информации увеличивается, объем передачи информации с помощью кабеля существенно уменьшился, так как во многих устройствах приема-передачи начинают использоваться антенны. Устройство антенн является непростым из-за требований к новым конструкциям, имуществу, качеству и свойствам.

Неправильно разработанная антенна имеет низкую эффективность. Разработано много технологий проектирования антенн, но в настоящее время необходимы компактные и улучшенные антенны, и один из новых типов таких антенн – микрополосковая печатная антенна, имеющая низкую стоимость материала и легка в изготовлении. Первая печатная антенна была изобретена в 1950 году, но широкое распространение она получила после 1970 года [1]. Печатную антенну можно представить в виде металлической пластины, которая напечатана на заземленной подложке. Благодаря возможности изготовления с использованием печатных технологий [2] антенну можно изготовить вручную, что снижает стоимость, к тому же выбор материала также уменьшит цену. Небольшой вес и малые габариты печатной антенны позволят применять ее для целей радиолокации.

Главная проблема печатных антенн – поверхностные волны. Распространение поверхностных волн снижает эффективность антенны из-за увеличения боковых и задних лепестков диаграммы направленности, что уменьшает усиление антенны. В конструкции печатной антенны есть проблема, называемая взаимным сцеплением (взаимовлия-

нием). Уменьшения как взаимной связи, так и поверхностных волн можно получить с помощью импедансных поверхностей с запрещенной зоной, или так называемыми электромагнитными структурами запрещенной зоны [3]. Электромагнитные структуры запрещенной зоны представляют собой искусственные периодические объекты, способные подавлять поверхностные волны вследствие фильтрации электромагнитных волн в определенной полосе частот.

В данной работе изучены проектирование и разработка компактных электромагнитных структур запрещенной зоны из метаматериалов. Нами предложены разные формы разных форм разделения кольцевых резонаторов и дополнительных разрезных колец резонаторов [4–6]. С помощью моделирования исследованы поведение и свойства данных структур. Производительность печатной антенной решетки сравнена для двух случаев с электромагнитной структурой запрещенной зоны и без нее.

Метаматериалы – это искусственные материалы с отрицательной диэлектрической и магнитной проницаемостью. Становится популярным использование метаматериалов или метаматериальных структур в системах печатной антенны [4, 5]. Метаматериалы хорошо подавляют распространение нежелательной волны на поверхности печатной антенны. Эта структура имеет хорошую изоляцию антенной решетки, предотвращая их взаимную связь.

Нами изучены различные типы структур запрещенной зоны: спиральные, в виде вилки, с гексагональной формой и грибовидные.

Все антенны предназначены для работы на частоте 5,9 ГГц. Моделирование предлагаемых антенных систем проведено с помощью программного обеспечения FEKO и CST Microwave Studio [7, 8]. Численные результаты, полученные при моделировании, показывают, что разработанные электромагнитные структуры запрещенной зоны расширяют полосу пропускания, одновременно подавляя взаимную связь между антенными элементами.

В первой части статьи рассмотрена концепция построения печатной микрополосковой антенны, печатной антенны с различными типами питания и электромагнитной структурой запрещенной зоны. Во второй части статьи исследована эффективность печатной антенны со структурами запрещенной зоны и без них.

### **Электромагнитные структуры запрещенной зоны**

Структуры запрещенной зоны определяются как периодические ячейки, подавляющие поверхностные волны. Структуры запрещенной зоны представляют собой толстые металлические проводники, которые выглядят как микрополосковая или печатная антенна. Но их типы, формы существенно различаются. Они представлены упорядоченными рядами и столбцами, что показано на рисунке 1. Структуры запрещенной зоны компактны и имеют хорошие возможности для повышения эффективности телекоммуникационных систем [9].

Большинство исследователей классифицируют структуры EBG следующим образом:

- трехмерные объемные структуры;
- плоские поверхности;
- одномерные передающие линии.

Причем структура запрещенной зоны называется фотонной запрещенной зоной, или поверхностью с высоким импедансом [10].

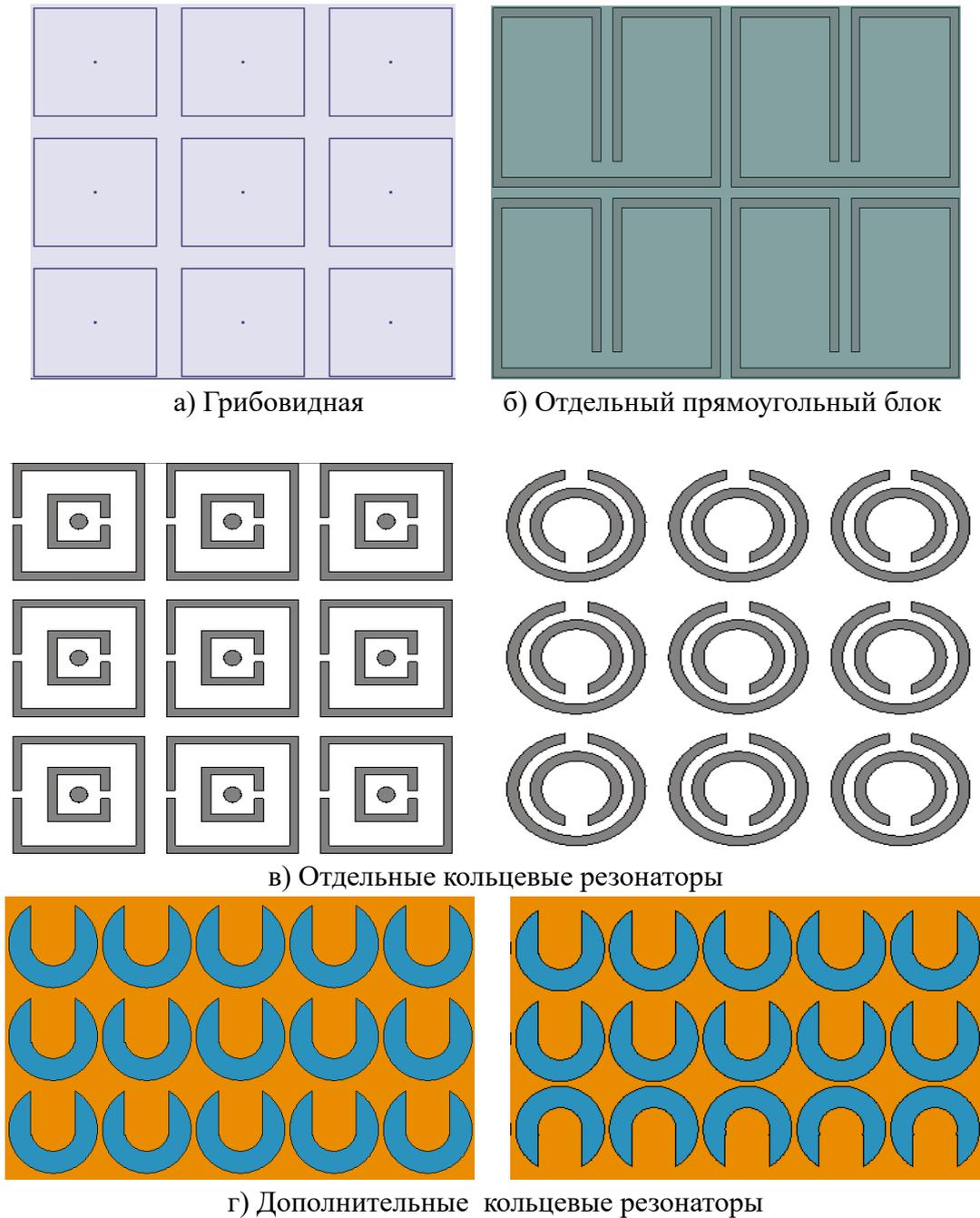


Рисунок 1. Структуры запрещенной зоны

Как уже сказано, развитие технологии беспроводной связи требует компактных, высокоэффективных и портативных устройств, однако в компактном устройстве взаимная связь между элементами антенн увеличивается. Кроме того, уровень шума системы увеличивается и влияет на качество системы. Структуры запрещенной зоны блокируют поверхностные волны (рисунок 2) и улучшают свойства печатной антенной решетки [11].

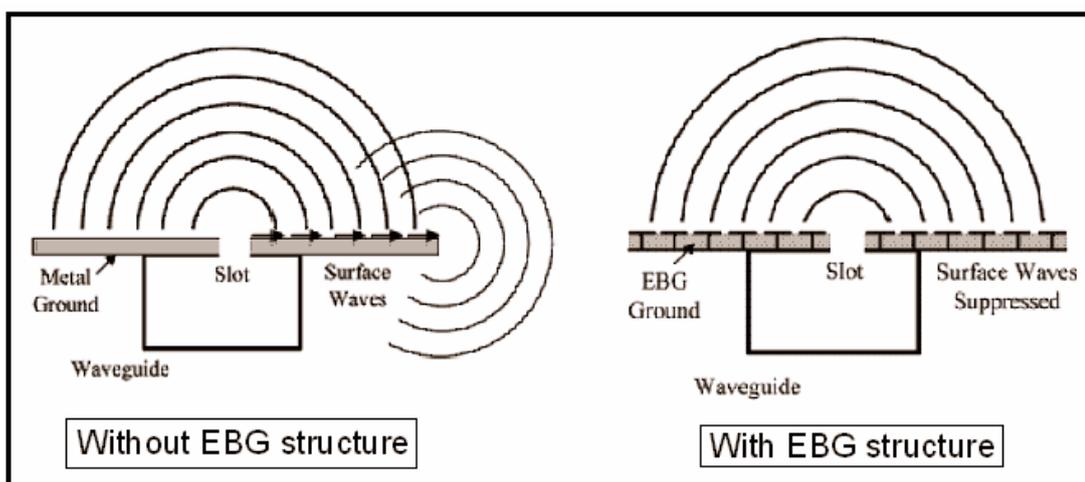


Рисунок 2. Блокирование поверхностных волн с помощью структур запрещенной зоны

Структуры запрещенной зоны могут иметь различную форму и каждая форма будет иметь свой диапазон частот. Для повышения качества необходимо применить параметрическую развертку и итерации. Структуры запрещенной зоны могут быть индуктивными или емкостными. Принцип работы этих структур обсуждается ниже.

### Поверхностные волны

Поверхностные волны являются причиной взаимного влияния, что вызывает искажения сканирования в антенных решетках, и излучение антенны происходит в нежелательной области.

Когда коэффициент диэлектрической проницаемости материала  $\epsilon_r > 1$ , поверхностные волны распространяются на печатной антенне. Процесс таков: волны падают под углом на плоскость земли, затем получают отражение и соответствуют диэлектрической и воздушной границе, где снова происходит отражение. Этот процесс идет до границы, где волны отражаются и дифрагируют по краям, (рис. 3). Если есть еще одна антенная решетка, то поверхностные волны могут удваиваться. Фазовая скорость распространения волны зависит от  $\epsilon_r$  и  $h$  [12], где  $h$  – высота диэлектрика.

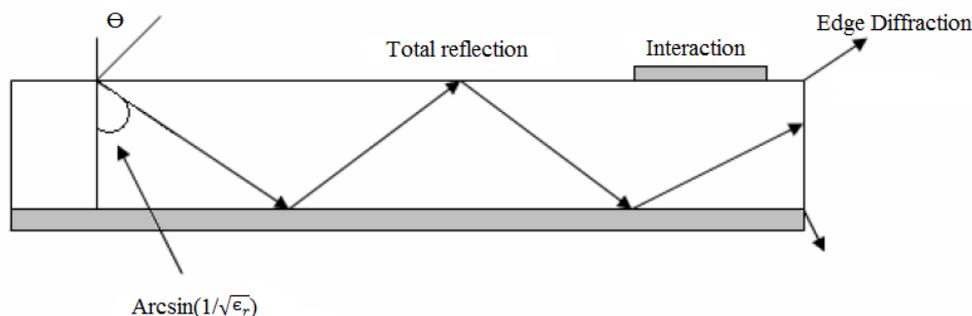


Рисунок 3. Распространение поверхностных волн в диэлектрике решетки

### Результаты и обсуждение

Обратные потери и результаты пропускной способности разработанных одиночных и решетчатых антенн, получены с помощью компьютерной программы FEKO. Результаты моделирования антенн отличаются от реальных результатов, поскольку программы учитывают идеальные условия, что выполнить на практике довольно слож-

но. Идеальные решения не могут быть получены, так как диэлектрик неоднороден и в материалах по всем направлениям изменяется  $\epsilon$ , чистота используемых материалов влияет на изменение резонансной частоты.

#### Сопоставление импеданса

Для получения точных результатов необходимо сопоставление импеданса. Позиция подачи была настроена для обеспечения оптимального соответствия. Конечная позиция подачи находится на расстоянии 2 мм от края печатной антенны.

Входной импеданс приведен на рис. 4, который иллюстрирует, что на резонансной частоте мнимая часть импеданса близка к нулю, а действительная часть составляет почти 50 Ом.

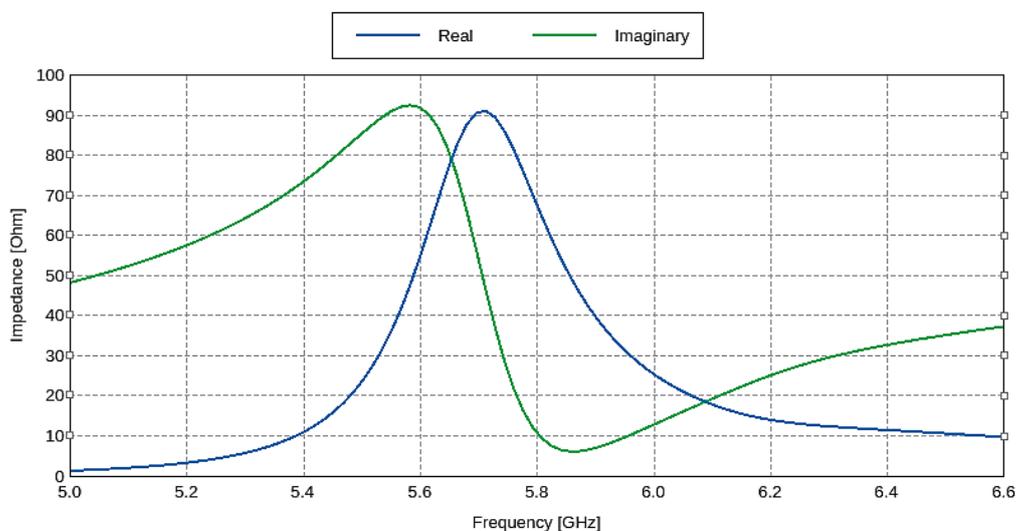


Рисунок 4. Входное сопротивление антенны

#### Антенная решетка со структурой запрещенной зоны

Параметры одной ячейки со структурой запрещенной зоны:  $R_0=3,6$  мм,  $R_i=1,8$  мм и  $C_w=3,6$  мм, как показано на рис. 5.

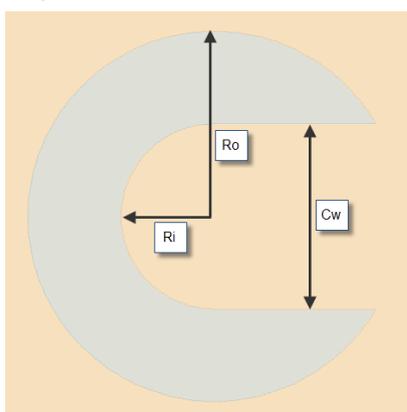
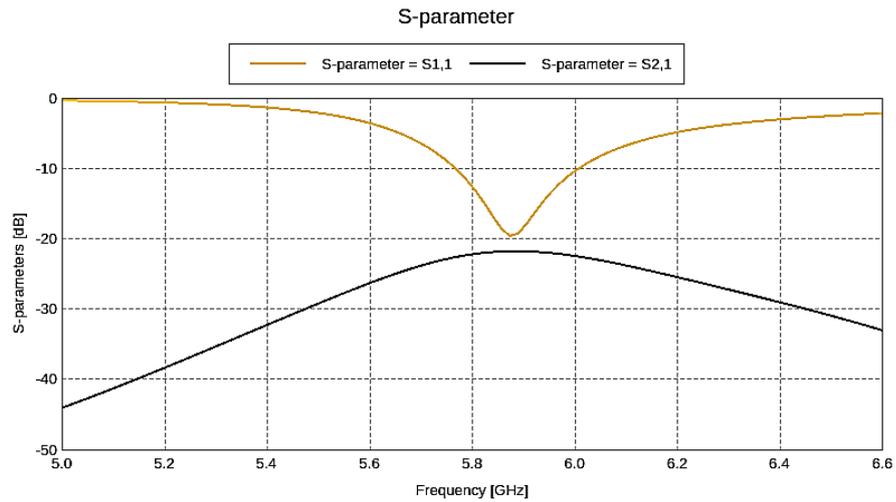
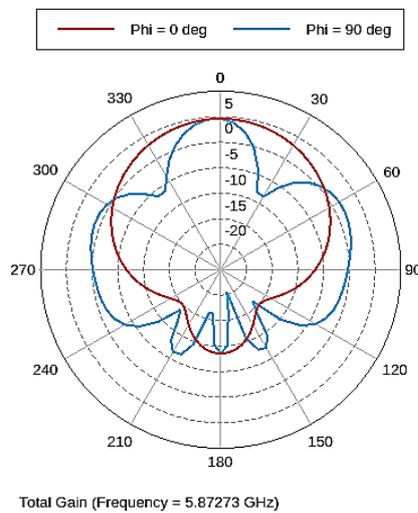


Рисунок 5. Параметры одной ячейки

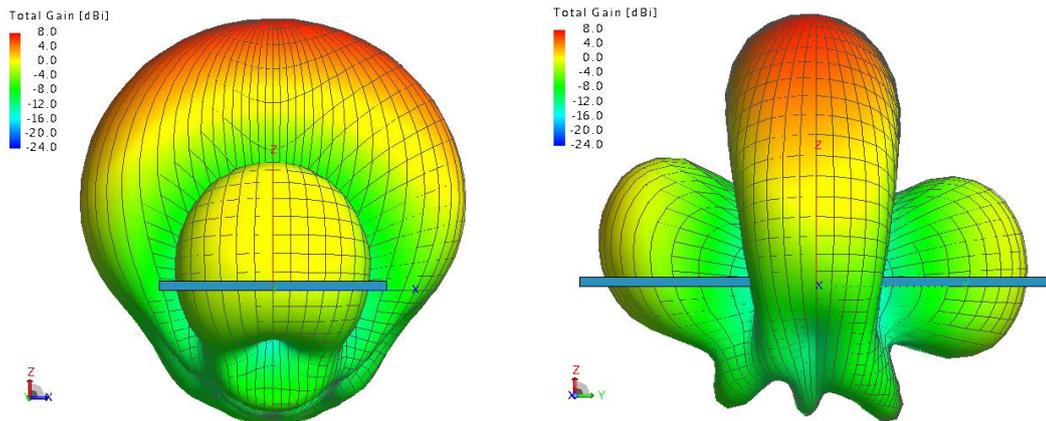
Возвратные потери антенной решетки без структуры запрещенной зоны составляют  $-20$  дБ, а взаимная связь составляет  $-21,75$  дБ на частоте 5,87 ГГц (рис. 6 а).



а) Обратные потери и взаимная связь



б) Усиление



в) Радиолокационная диаграмма

Рисунок 6. Численные результаты антенной решетки без структуры запрещенной зоны

Для антенной решетки со структурой запрещенной зоны на рис. 7 показаны обратные потери, взаимная связь, усиление, диаграмма направленности дальнего поля и токи на поверхности антенны показаны на рис. 8.

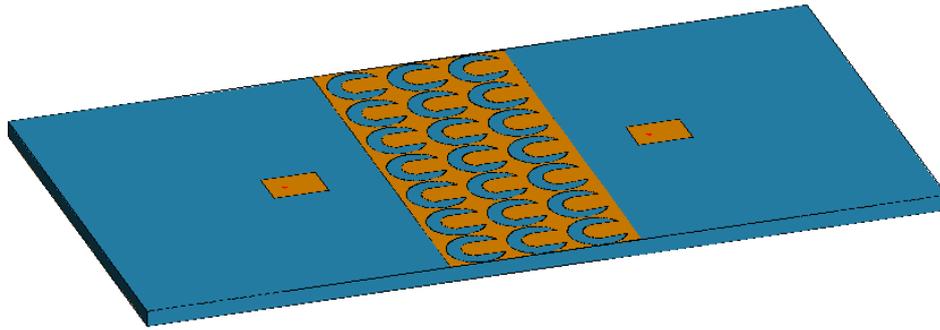
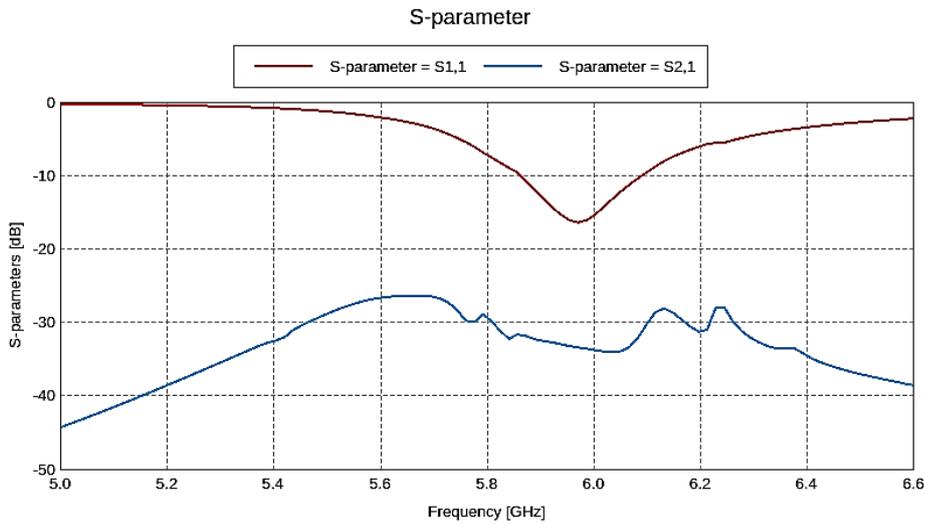
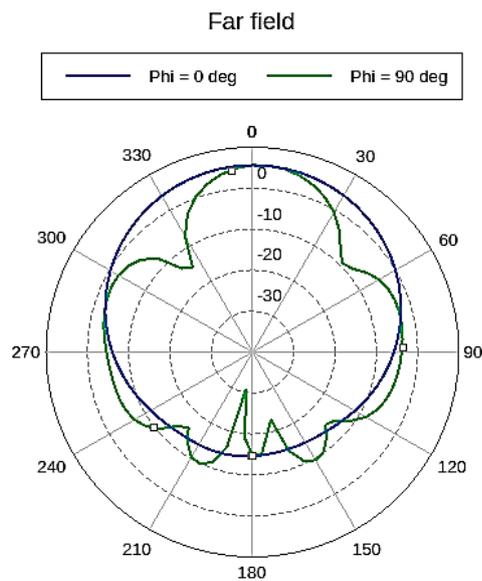


Рисунок 7. Антенная решетка со структурой запрещенной зоны

После вставки структуры запрещенной зоны резонансная частота слегка сдвигалась до 5,97 ГГц, но взаимная связь была увеличена до  $-35$  дБ и уменьшена на 13,25 дБ, чем в антенной решетке без структуры запрещенной зоны. Это означает, что произошло значительное сокращение (рис. 8 а).

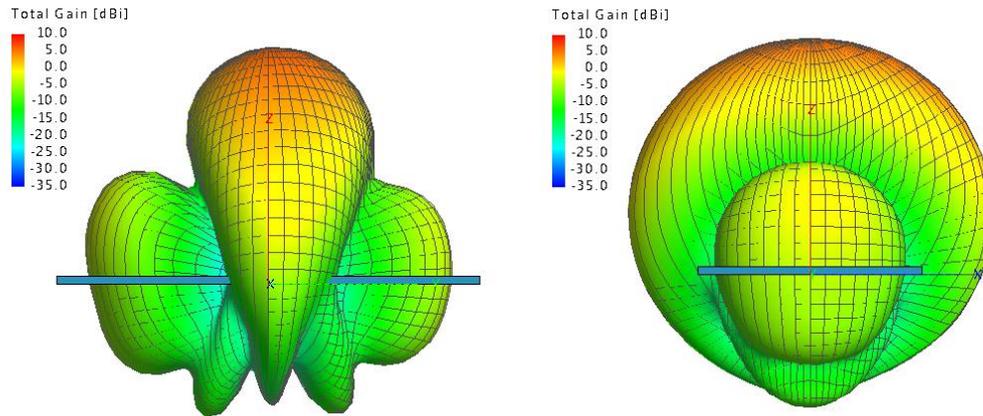


а) Обратные потери и взаимная связь

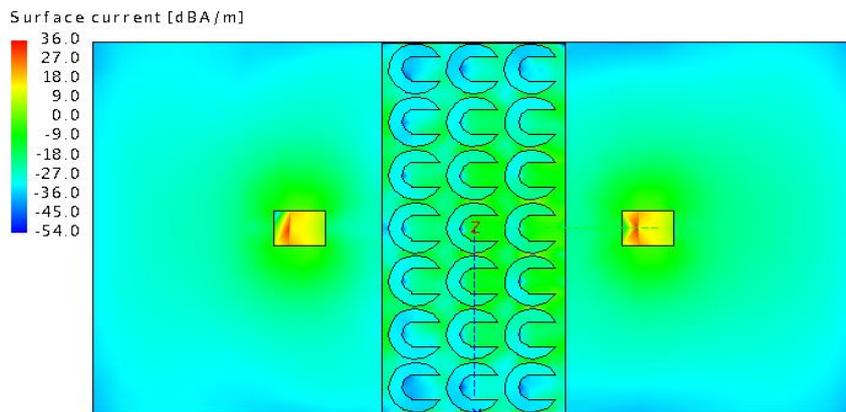


Total Gain (Frequency = 5.87273 GHz)

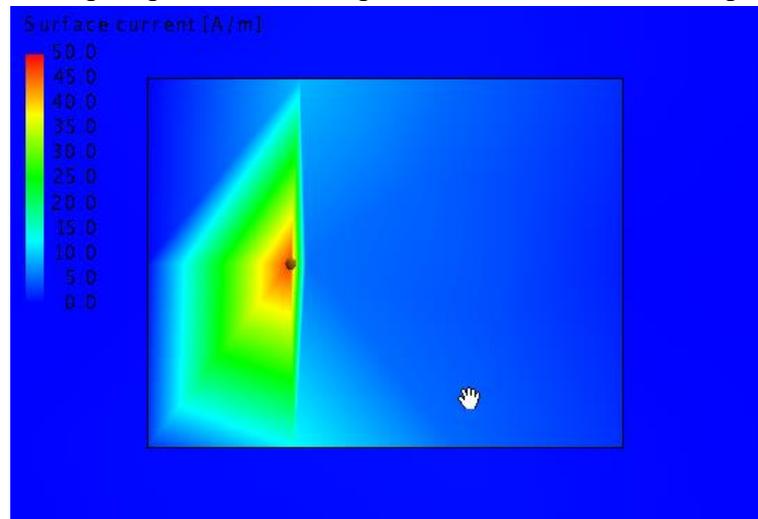
б) Усиление



в) Радиолокационная диаграмма



г) Снимок распределения поверхностного тока антенной решетки



д) Снимок распределения поверхностного тока на одной антенне

Рисунок 8. Численные результаты моделирования антенной решетки со структурой запрещенной зоны

Для антенной решетки с перестроенной структурой запрещенной зоны на рис. 9 показаны обратные потери, взаимная связь, усиление, диаграмма направленности дальнего поля и токи на поверхности антенны приведены на рис. 10.

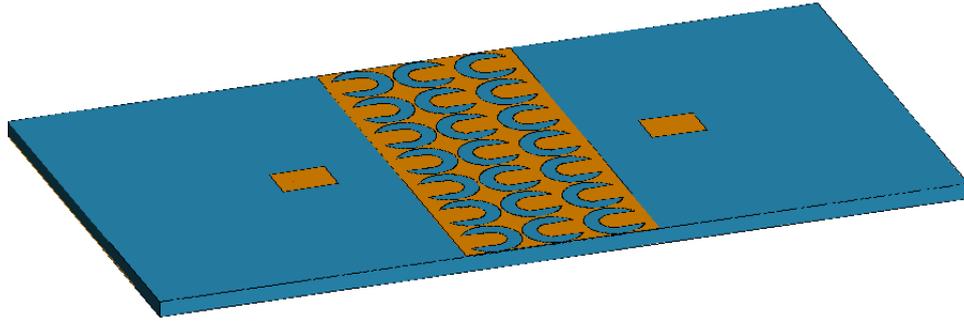
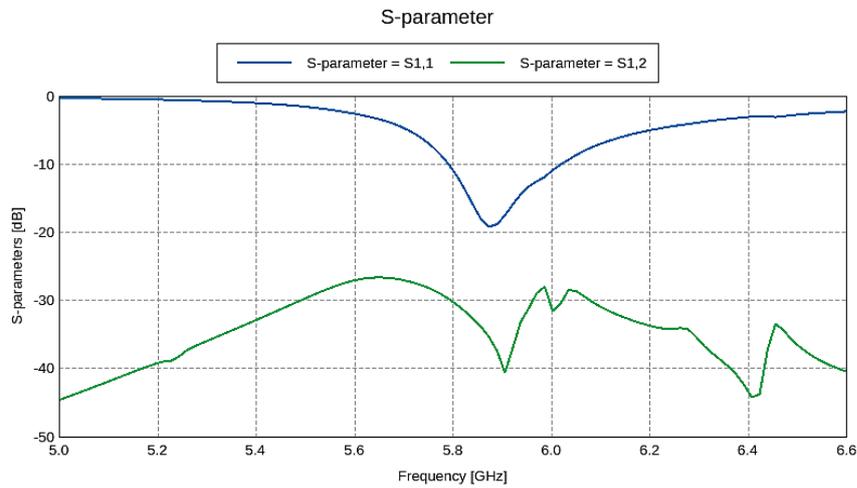
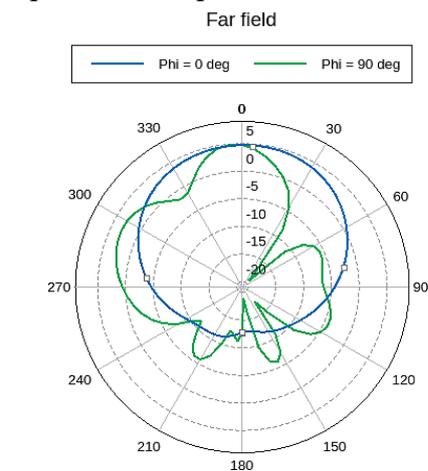


Рисунок 9. Антенная решетка с перестроенной структурой запрещенной зоны

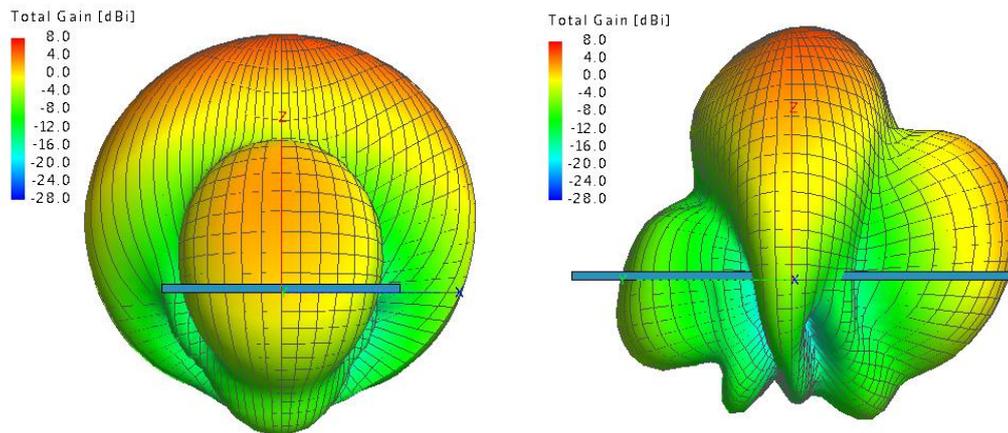
Численные результаты моделирования антенной решетки с перестроенной структурой запрещенной зоны следующие: взаимная связь произошла в  $-41$  дБ со смещением частоты до  $5,9$  ГГц, но достигнуто снижение потерь до  $19,25$  дБ. Получено существенное уменьшение взаимной связи (рис. 8 а), по сравнению с антенной решеткой с нормальной (не перестроенной) структурой запрещенной зоны.



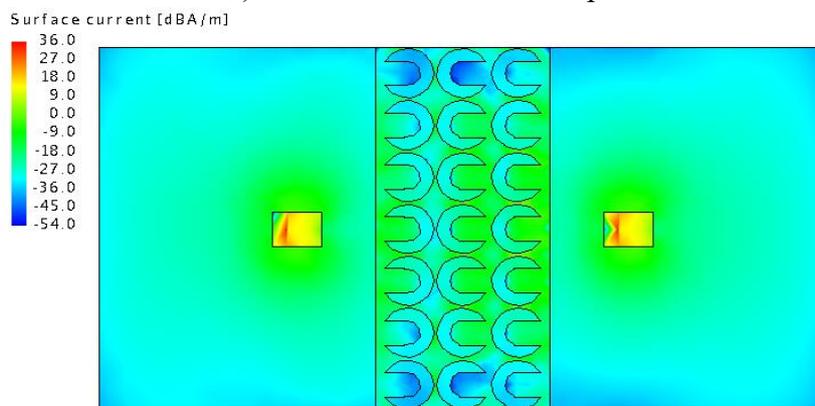
а) Возвратные потери и взаимная связь



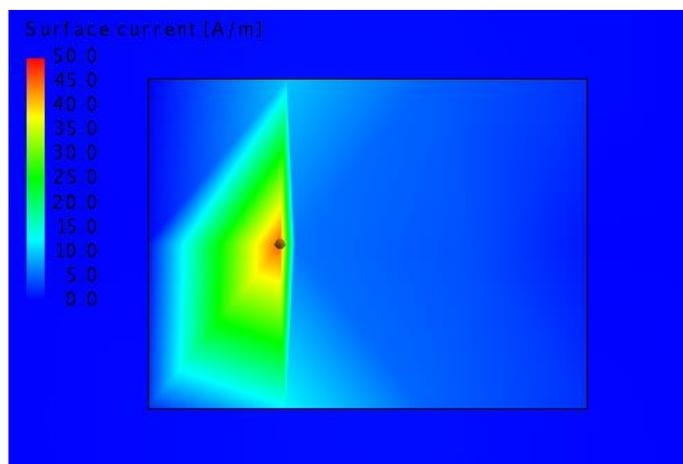
б) Усиление



в) Радиолокационная диаграмма



г) Снимок распределения поверхностного тока антенной решетки



д) Снимок распределения поверхностного тока на одной антенне

Рисунок 10. Численные результаты моделирования антенной решетки с перестроенной структурой запрещенной зоны

Таким образом, проанализированы характеристики антенны с метаматериальной структурой запрещенной зоны. При этом было отмечено увеличение пропускной способности традиционной антенны. Исследованы обратные потери, взаимная связь, резонансная частота и ширина полосы пропускания. Выяснено, что взаимная связь антенной решетки со структурой запрещенной зоны выше по сравнению с антенной без структуры запрещенной зоны, полоса пропускания для антенной решетки со структу-

рой запрещенной зоны шире. Следовательно, параметры структур запрещенной зоны могут быть подобраны для улучшения характеристик антенн.

### *Литература*

1. Pozar D.M. (1992). Microstrip antennas, *Proc. IEEE*, 80, 79–91.
2. Howell J. (1972). Microstrip antennas, *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 10, 177–180.
3. Turdumamatov S., Ogucu G. (2014). Metamaterial-Inspired Electromagnetic Band Gap Structure for Isolation Improvement of Microstrip Patch Antenna, *Second International Conference on Advances in Computing, Electronics and Communication (ACEC)*, 147 – 150.
4. Kafesaki M., Koschny Th., Penciu R. S., Gundogdu T. F., Economou E. N., Soukoulis C.M. (2005). Left-handed metamaterials: detailed numerical studies of the transmission properties. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 7, 12–22.
5. Falcone F., Lopeteggi T., Baena J.D., Marques R., Martin F., Sorolla M. (2004). Effective negative-epsilon stopband microstrip lines based on complementary split ring resonators. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 14, 280–282.
6. Ferran Martin, Jordi Bonache. (2014). Application of RF-MEMS-Based Split Ring Resonators (SRRs) to the Implementation of Reconfigurable Stopband Filters: A Review. *Sensors*, 14, 22848–22863
7. FEKO - EM Simulation Software. (2017). <https://www.feko.info>
8. CST-Computer Simulation Technology. (2017). <https://www.cst.com>
9. Chen P., Yang X., Chen C., Zhao Y. (2014). A Novel Uni-Planar Compact EBG Structure. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 45, 31–34.
10. Qian Y., Coccioli R., Sievenpiper D., Radisic V. (1999). A microstrip patch antenna using novel photonic band-gap structures. *Microwave Journal*, 42, 66–76.
11. Yang F. (2002). Applications of Electromagnetic Band-Gap (EBG) Structures in Microwave Antenna Designs. *Invited presentation at Tampere University of Technology*.
12. Balanis C.A. (2005). *Antenna Theory: Analysis and Design*. 2<sup>nd</sup> Ed. New York: John Wiley and Sons.