

Применение высокоимпедансных поверхностей при проектировании антенных решеток

А.А. Петров

АО «НИИ «Вектор», г. Санкт-Петербург

Аннотация: Рассмотрен метод снижения влияния поверхностных волн при проектировании планарных антенных решеток. Рассчитаны габариты и выполнено моделирование элементарной ячейки грибовидного элемента. Проведено моделирование классической антенной решетки, состоящей из 2×2 элементов вида «патч» и получены частотные зависимости $|S_{11}|$, коэффициента усиления, уровня боковых лепестков. В аналогичных габаритах печатной платы была промоделирована антенная решетка 2×1 с применением высокоимпедансной поверхности. Выполнено сравнение частотных характеристик и показано видимое преимущество использования данного метода проектирования антенных решеток в рамках рассмотренного количества антенных элементов.

Ключевые слова: высокоимпедансные поверхности, EBG-структуры, антенны решетки.

1. Введение

Использование классических печатных антенн вида «патч» по-прежнему сохраняет популярность в современных разработках ввиду их простоты, низкой стоимости и компактности. Однако, подобные структуры не отличаются широкой полосой рабочих частот и высоким коэффициентом усиления (КУ), в лучшем случае не превышающего 8-9 дБи. Последняя проблема решается применением технологии антенных решеток (АР), позволяющая не только увеличить КУ, но и обеспечить необходимое амплитудно-фазовое распределение для формирования желаемой диаграммы направленности (ДН). Существенным недостатком использования АР является значительное увеличение габаритов антенной системы, оценку которых можно дать по инженерному соотношению: увеличение количества элементов АР вдвое приводит к увеличению КУ не более чем на 3 дБ. Для достижения высокого значения КУ АР необходимо повышать расстояние между антенными элементами, однако данное решение ограничено возрастающим уровнем боковых лепестков (УБЛ), что является негативным параметром ДН.

Одной из причин снижения КУ и повышения УБЛ в АР является наличие поверхностных волн, вызывающих паразитное излучение в боковых направлениях. Наиболее простым методом борьбы с данным явлением является уменьшение толщины используемых диэлектрических подложек. К достаточно перспективной идее в борьбе с поверхностными волнами относится применение высокоимпедансных поверхностей, принцип работы которых схож с поведением метаматериалов [1].

Значительное количество подобных структур в совместном применении с печатными антеннами описано в [2-6], однако, полноценного сравнительного анализа по отношению к классическим АР проведено не было. Настоящая работа включает разработку модели АР с использованием грибовидной высокоимпедансной или Electromagnetic Band Gap (EBG) структурой и сравнение ее характеристик с АР, построенной в тех же габаритах. Критериями качества в данном случае являются: относительная полоса рабочих частот по уровню $|S_{11}| < -10$ дБ, величина КУ и УБЛ в рабочем диапазоне.

2. Проектирование антенной решетки с высокоимпедансной структурой

Проектирование антенны с высокоимпедансной структурой всегда включает в себя два этапа: расчет антенного элемента и окружающей его ЕВГ-поверхности. Расчет габаритов патч-антенны (также, как и АР) является сравнительно простой и широко известной задачей [4], поэтому в рамках данной работы первый этап рассматриваться не будет.

Для расчета грибовидного элемента предлагается несколько эквивалентных схем, общий смысл которых сводится к замещению «ножки» эквивалентной индуктивностью, а «шляпки» – емкостным элементом, тем самым образуя параллельный колебательный контур, резонанс которого необходимо достичь при оптимизации. Расчет номиналов элементов также не является однозначным для каждой из эквивалентных схем и требует последующей коррекции в среде электродинамического моделирования. В данной работе номиналы рассчитываются по следующим соотношениям [7]:

$$L = \mu_0 h \quad (1)$$

$$C = \frac{W \varepsilon_0 \varepsilon}{\pi} \operatorname{acosh} \left(\frac{W + g}{g} \right) \quad (2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$, h – толщина подложки, W – ширина верхней пластины, ε – диэлектрическая проницаемость подложки, g – расстояние между пластинами. Исходя из найденных номиналов (1), (2), определяется резонансная частота колебательного контура $f = \left(2\pi \sqrt{LC} \right)^{-1}$, на которую необходимо настроить ЕВГ-структуру. В рамках данной работы антенны проектируется на резонансную частоту 5.3 ГГц.

В качестве подложки используется материал Rogers RT/duroid 5880 ($\varepsilon=2.2$). Первоначальный расчет габаритов методом эквивалентной схемы рекомендует использовать следующие значения: $W=12.35$ мм, $g=1.2$ мм, $h=3$ мм, однако, электродинамическое моделирование с применением ячейки Флоке (рис.1) показало необходимость коррекции ширины верхней пластины и зазора между ними: $W=12$ мм, $g=1.1$. Требуемые габариты определялись по фазе коэффициента отражения на резонансной частоте, величина которой должна быть равна 0° , что соответствует идеальному магнитному проводнику.

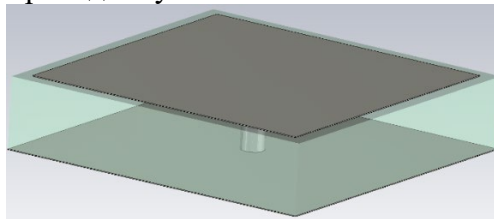


Рисунок 1. Элементарная ячейка грибовидного элемента

Рассчитанная ЕВГ-структура в окрестности частоты резонанса образует высокоимпедансную поверхность, которая препятствует распространению поверхностных волн, вызывающих паразитное боковое излучение антенного элемента, тем самым повышая его КУ [2]. Очевидным недостатком данного решения является увеличение габаритов антенной системы, что может считаться нерациональным при возможности достижения аналогичных характеристик за счет применения АР.

Для сравнительного анализа была спроектирована АР, состоящая из двух излучающих элементов вида «патч», ориентированных в пространстве таким образом,

чтобы векторы электрического поля каждой антенны были параллельны друг другу (рис. 2а). Для данной структуры дополнительно используется два ряда грибовидных элементов. Количество ЕВГ-элементов было определено в результате электродинамического моделирования как достаточное для обеспечения КУ большего, чем у стандартной АР, состоящей из 2 элементов. В аналогичных габаритах (80×75×3 мм) была построена классическая АР, состоящая из четырех патч-антенн (рис. 2б). При этом межэлементное расстояние выбиралось исходя из компромиссного решения между максимальным КУ и удовлетворительным УБЛ. Каждая из АР возбуждается равноамплитудно и синфазно, при этом диаграммо-образующим устройством в модели принято пренебречь.

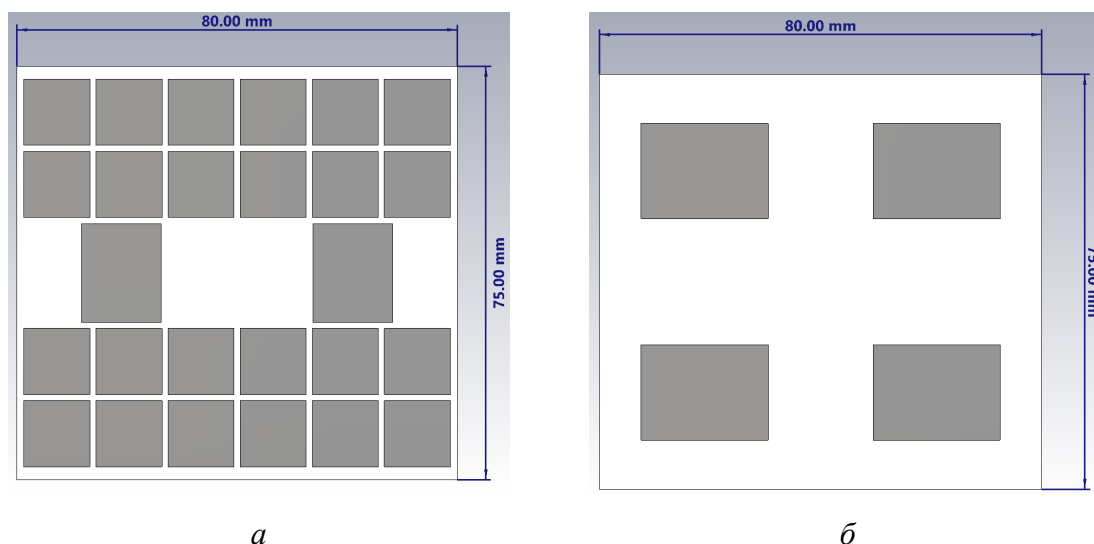


Рисунок 2. Антенные решетки с ЕВГ-структурой (а) и классического вида (б)

3. Результаты моделирования и сравнительный анализ

Полученные в результате электродинамического моделирования частотные зависимости модуля коэффициентов отражения (рис. 3) для АР классического вида и с применением ЕВГ-структуры показывают существенное расширения полосы рабочих частот в последнем случае. Для АР стандартного вида и с применением ЕВГ-структуры, диапазоны рабочих частот соответственно располагаются в интервалах от 5.22 до 5.39 ГГц (3.2% относительной ширины), и от 5.02 до 5.87 ГГц (15.7% относительной ширины).

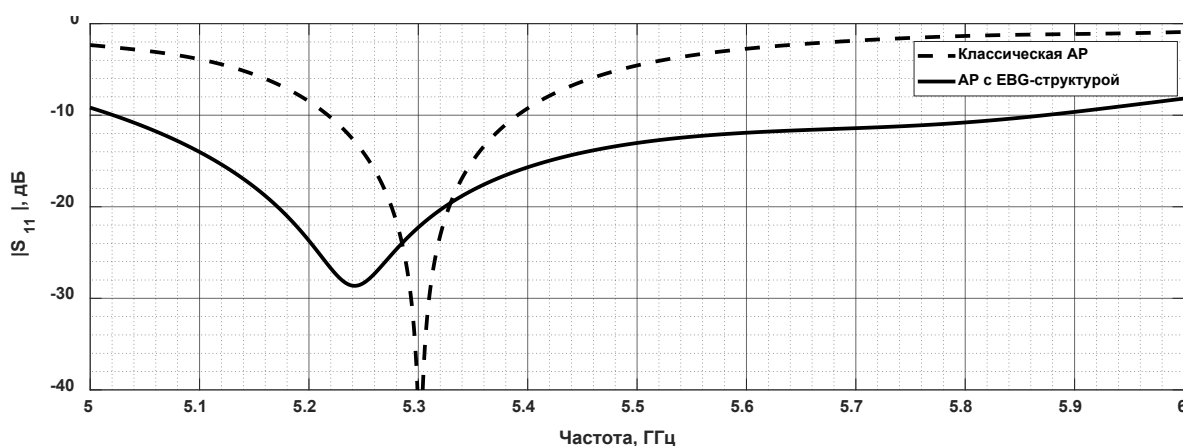


Рисунок 3. Семейство частотных зависимостей $|S_{11}|$ классической АР и с ЕВГ-структурой

Частотные зависимости КУ (рис.4а) показывают приблизительно равные величины в окрестности резонансной частоты, однако при отклонении от резонанса КУ классической АР резко уменьшается. АР с высокоимпедансной поверхностью демонстрирует гораздо стабильную частотную зависимость КУ в исследуемом диапазоне. Кроме того, для обеспечения примерно равных значений КУ, АР с EBG-структурой требует меньшего количества излучателей, чем классическая АР, что облегчает задачу разработки диаграммо-образующих устройств, однако, расходуемое пространство печатной платы остается прежним.

Аналогичное сравнение частотных зависимостей УБЛ (рис. 4б) для двух сечений ДН при азимуте 0° демонстрируют очевидный выигрыш АР с грибовидными элементами на 5.5 дБ на резонансной частоте соответственно. При этом азимут 0° соответствует направлению от «патчей» на грибовидные элементы.

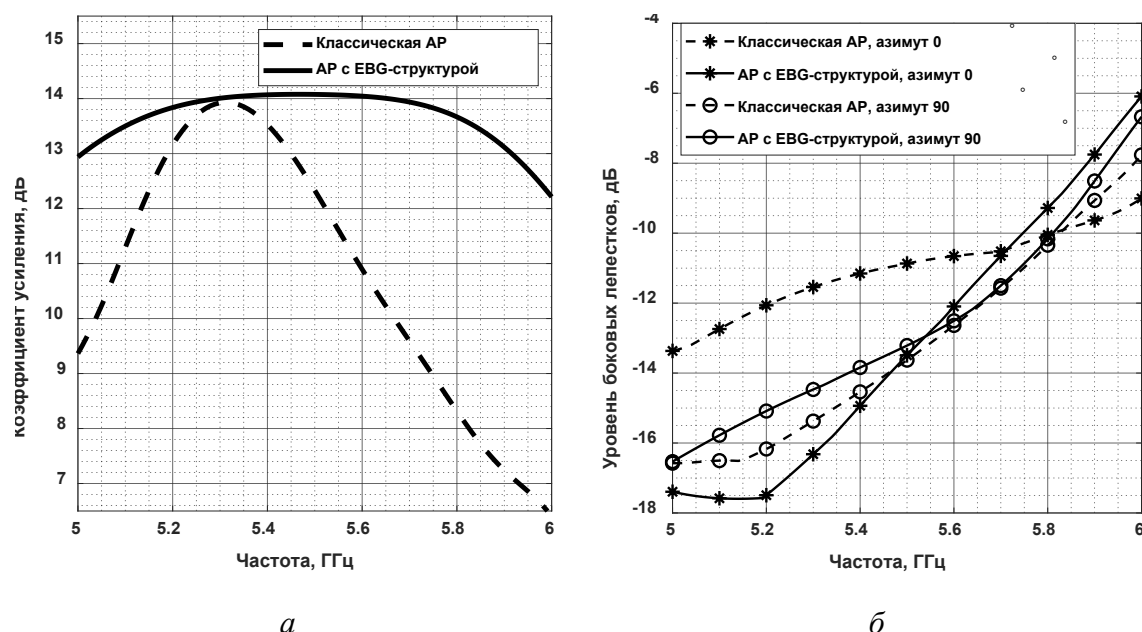


Рисунок 4. Семейство частотных зависимостей КУ (а) и УБЛ (б) классической АР и с EBG-структурой

4. Заключение

Сравнительное исследование АР классического вида и с применением высокоимпедансных поверхностей демонстрирует видимое преимущество последних в рамках рассмотренной задачи по всем рассматриваемым критериям: диапазон рабочих частот по уровню $|S_{11}| < -10$ дБ, КУ и УБЛ. АР с EBG-структурой позволила расширить относительную полосу рабочих частот относительно классической АР от 3.2% до 15.7%. КУ, который был достигнут стандартной АР, можно обеспечить с помощью высокоимпедансной поверхности с использованием меньшего количества излучающих элементов, что также является ее существенным достоинством. При этом УБЛ, полученный с помощью высокоимпедансной структуры, позволяет достигать относительно высоких значений КУ.

Исследование выполнено при **финансовой поддержке АО «НИИ «Вектор»**.

Список литературы

1. Munk B. A. Metamaterials: critique and alternatives. – John Wiley & Sons, 2009.
2. Pandey A. Practical microstrip and printed antenna design. – Artech House, 2019.
3. Alsudani A., Marhoon H. M. Design and Enhancement of Microstrip Patch Antenna Utilizing Mushroom Like-EBG for 5G Communications //J. Commun. – 2023. – Т. 18. – №. 3. – С. 156-163.

4. Abdulhameed M. K. et al. Mushroom-like EBG to improve patch antenna performance for C-band satellite application //International Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2018. – Т. 8. – №. 5. – С. 3875.
5. Sievenpiper D. et al. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band //IEEE Transactions on Microwave Theory and techniques. – 1999. – Т. 47. – №. 11. – С. 2059-2074.
6. Yang F., Rahmat-Samii Y. Microstrip antennas integrated with electromagnetic band-gap (EBG) structures: A low mutual coupling design for array applications //IEEE transactions on antennas and propagation. – 2003. – Т. 51. – №. 10. – С. 2936-2946.
7. Антипов С. А. и др. Исследование влияния расстояния между антеннами в ММО антенной решетке для сетей пятого поколения //Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2020. – Т. 16. – №. 4. – С. 91-95.