

ПРОГРАММИРУЕМЫЕ ОТРАЖАЮЩИЕ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Львов А.В., Иващенко И.В.,
Бондарева П.И., Панарина П.В.

Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»,
департамент электронной инженерии
МИЭМ НИУ ВШЭ

Аннотация

В настоящее время проводится множество исследований в области новых решений для беспроводных сетей связи 5 и 6 поколения. Одним из таких решений являются программируемые отражающие поверхности (ПОП). В данной работе рассматриваются разработка и исследование фазово сконфигурированного линейно поляризованного образца ПОП с оригинальным дизайном фазовращателя.

Введение

Изучение инновационных беспроводных технологий является актуальной областью исследований и разработок. Применение сетей связи нового поколения из-за атмосферных потерь при распространении излучения [1] предъявляет особые требования к формированию узконаправленных пучков излучения [2]. Этот факт ставит перед исследователем задачу создания антенн с узкой диаграммой направленности, с возможностью управления и перестройки диаграммы направленности в реальном времени. Новые аппаратные и программные решения призваны уменьшить потери на распространение сигнала из-за макро- и микромобильности, а также динамических блокировок сигнала [3]. В ряде случаев наиболее оптимальным решением являются ПОП.

ПОП представляет собой пассивную рефлекторную антенну, которая состоит из массива патч-антенн и фазовращателя. Фазовращатель в свою очередь оснащен системой управления набегом фазы, что позволяет задавать направление отражения падающего излучения. Это решение потенциально позволяет обеспечить стабильность сигнала путём размещения сети ПОП в виде аппаратно-программного комплекса, отслеживающего состояние канала связи между базовой станцией и пользовательским оборудованием [4].

Научным коллективом базовой кафедры квантовой оптики и телекоммуникаций ЗАО «Сконтел» МИЭМ ВШЭ ранее проводились научные исследования схожей тематики в диапазоне частот 5/6G. Актуальность данной работы связана с отсутствием коммерчески доступных устройств в диапазоне частот 5G. Данная работа сконцентрирована на исследовании фазово сконфигурированного экспериментального образца на указанный диапазон частот.

Электромагнитная модель

В ходе аналитического обзора научно-технической информации были проанализированы различные решения в области ПОП для частот 2,7 и 15 ГГц [4, 5]. На основе приведенных данных была разработана электромагнитная (ЭМ) модель структуры ПОП в среде численного моделирования, которая использует метод конечных элементов для численного расчета. Структура модели приведена на рис.1.

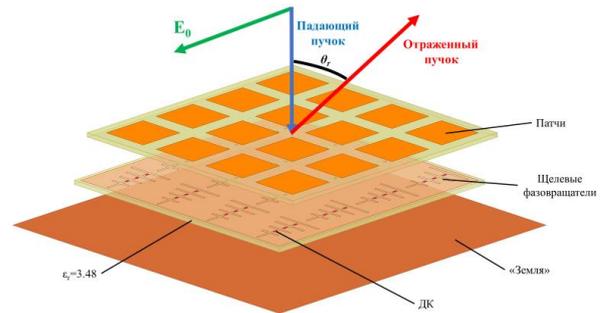


Рис.1. Схема устройства ПОП

Управление конфигурацией ПОП осуществляется при помощи набора диодных ключей (ДК), которые задают набег фаз в ячейках ПОП. Для упрощения конструкции при расчетах и прототипировании каждый диод представлен либо проходным участком щелевой линии (диод в состоянии «закрыто»), либо закороченным участком щелевой линии (диод в состоянии «открыто»).

По результатам моделирования получен профиль Гауссова пучка в отражении, демонстрирующий отклонение от законов геометрической оптики при отражении от ПОП. В качестве основной характеристики модели ПОП была построена диаграмма направленности отражателя в плоскости отражения (рис.2). Ожидаемый угол отклонения пучка, отраженного от экспериментального образца ПОП, определенный по максимуму отраженного излучения, согласно приведенной на графике диаграмме составляет $\theta_r = 62,5^\circ$.

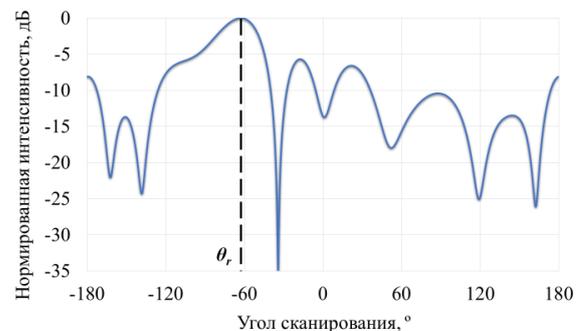


Рис.2. Профиль отраженного от ПОП пучка в E-плоскости, полученный по результатам моделирования

Материалы и методы

В качестве материальной основы для экспериментального образца ПОП был выбран фольгированный диэлектрик FSD888T со следующими характеристиками: толщина 1,524 мм, диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 3,48$, тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta = 0,0012$. Данный материал выбирался из соображений достаточной механической прочности и низких электрических потерь.

Методом изготовления экспериментального образца ПОП была выбрана технология фрезерования печатных плат с использованием станка и числовым программным управлением, как оптимально совместимая с толщиной фольгированного диэлектрика и геометрическими параметрами структуры. Технологическая схема представлена на рис.3, где серым обозначены области поверхностного фрезерования для снятия металлизации (серым) и сквозного фрезерования (бирюзовым).

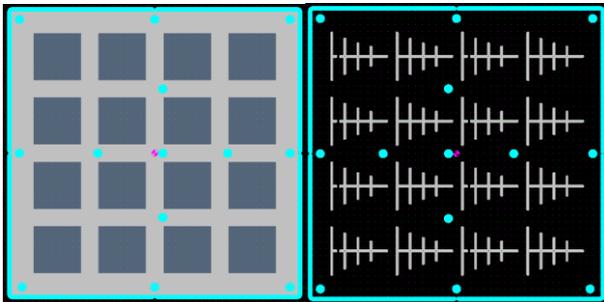


Рис.3. Технологические схемы обработки материала для ЧПУ станка

Экспериментальная характеристика изготовленного образца произведена методом измерения диаграммы направленности, который позволяет получить исчерпывающую информацию о способности образца ПОП производить отражение падающего СВЧ пучка под заданным углом.

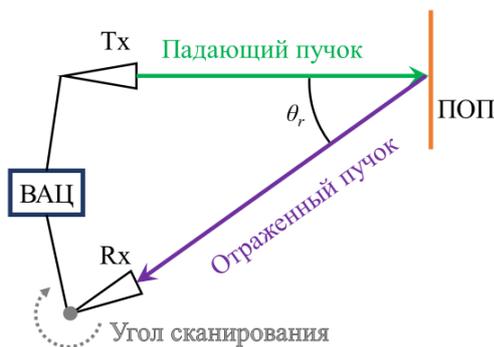


Рис.4. Схема экспериментальной установки

В соответствии со схемой экспериментальной установки, представленной ранее на рис.4, образец ПОП был помещен на линию не прямой видимости между Tx и Rx для проверки его отражательных свойств. Принимая во внимание результаты расчетов, мы опираемся на значение $\theta_r = 62,5^\circ$ при ориен-

тации оптической оси Rx, при этом Tx светит на ПОП перпендикулярно поверхности.

В качестве Tx и Rx использовались антенны на основе планарных массивов патч-антенн 1x4, оснащенных фидерной линией, для которых известна диаграмма направленности. Антенны изготавливались таким же методом на том же материале. В процессе измерений Tx и прототип ПОП находились в статическом положении, а оптическая ось Rx разворачивалась от -45° до $+45^\circ$ с шагом $0,5-1^\circ$. Tx и Rx в свою очередь подключены к векторному анализатору цепей (ВАЦ), при помощи которого мы получаем значения комплексного коэффициента передачи.

Геометрическое расположение элементов антенной сборки в процессе измерений было следующим:

- расстояние Tx-ПОП $L_{12} = 1,4$ м;
- расстояние ПОП-Rx $L_{23} = 1,27$ м;
- угол отклонения пучка $\theta_r = 46,5^\circ$.

Обсуждение результатов

Результаты измерения модуля S_{21} в децибелах для изготовленного образца ПОП представлены на рис.5.

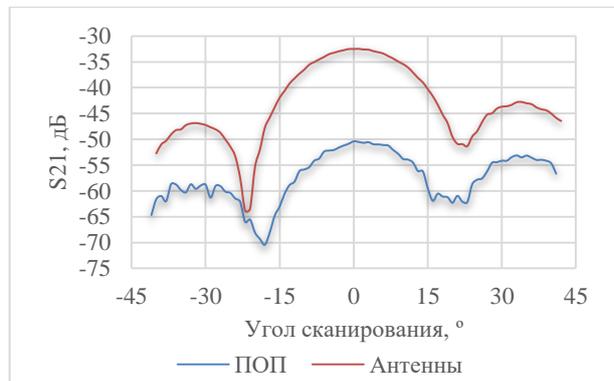


Рис.5. Измеренный профиль отраженного пучка в E-плоскости на частоте 4,8 ГГц

При построении профилей отраженного от ПОП пучка и пучков антенн Tx и Rx были учтены потери на увеличение оптического пути в тракте с использованием уравнения передачи Фрииса:

$$\frac{P_{Rx}}{P_{Tx}} = G_{Tx} G_{Rx} \left(\frac{\lambda}{4\pi L} \right)^2, \quad (1)$$

где P_{Rx} – принятая мощность, P_{Tx} – переданная мощность, G_{Rx} и G_{Tx} – коэффициенты усиления антенн, λ – длина волны, L – расстояние между антеннами. При измерении диаграммы направленности антенны расстояние Tx-Rx составляло 1,4 м, а полная длина оптического пути при измерении диаграммы направленности ПОП составляла 2,67 м. Таким образом, мы получили калибровочный коэффициент 5,6 дБ, который был использован для корректировки измеренных значений модуля S_{21} для профилей пучков антенн.

Анализ экспериментальных данных показал следующие ключевые результаты:

- Рабочая частота 4,8 ГГц,
- Угол отклонения пучка 46,5°.

Таким образом, результаты эксперимента показывают работоспособность системы, которая демонстрирует отклонение падающего пучка от законов геометрической оптики. Отклонения полученных результатов объясняются наличием i) технологических погрешностей при изготовлении антенн и щелевых фазовращателей фрезерной обработкой возможны отклонения от номиналов линейных размеров до $\Delta x = 50$ мкм, а также ii) особенностей режимов работы ЧПУ станка.

Заключение

В данной работе представлены результаты моделирования, подход к изготовлению, методика измерений и анализ результатов экспериментальных измерений фазово сконфигурированного линейно поляризованного образца ПОП с оригинальным дизайном фазовращателя. Согласно результатам моделирования образца ПОП, выполненного в среде ЭМ моделирования методом конечных элементов, ожидается, что угол отклонения нормально падающего СВЧ пучка от ПОП составит $\theta_r = 62,5^\circ$.

Измерение диаграммы направленности образца, изготовленного по технологии фрезерования печатных плат, показало качественное соответствие расчетного и экспериментально полученного угла отклонения падающего СВЧ пучка. При этом погрешности изготовления привели к отклонению параметров от модельных на 25% по углу отклонения и на 4% от рабочей частоты, что позволяет утверждать принципиальную работоспособность системы и дает вектор дальнейших исследований.

В дальнейшем возможно исследование многопозиционной ПОП использующей набор диодных ключей в качестве управляющей системы. Сетка из нескольких таких устройств может быть использована для сверхбыстрой маршрутизации СВЧ пучка при возникновении динамических блокировок радиосигнала в беспроводном канале связи 5G

Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность за консультации и активное участие в анализе результатов на всех этапах исследования сотрудникам базовой кафедры квантовой оптики и телекоммуникаций ЗАО «Сконтел» МИЭМ ВШЭ: старшему научному сотруднику Шуракову Александру Сергеевичу и доценту Ожегову Роману Викторовичу.

Список литературы

1. Jornet J. M., Akyildiz I. F. Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band //IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2011. – Т. 10. – №. 10. – С. 3211-3221.
2. Akyildiz I. F., Jornet J. M. Realizing ultra-massive MIMO (1024× 1024) communication in the (0.06–10) terahertz band //Nano Communication Networks. – 2016. – Т. 8. – С. 46-54.

3. Shurakov A. et al. Empirical blockage characterization and detection in indoor sub-THz communications //Computer Communications. – 2023. – Т. 201. – С. 48-58.

4. Dai L. et al. Reconfigurable intelligent surface-based wireless communications: Antenna design, prototyping, and experimental results //IEEE access. – 2020. – Т. 8. – С. 45913-45923.

5. A. V. Lvov, A. N. Prikhodko, A. S. Shurakov, G. N. Goltsman. Reconfigurable Reflectarrays for 5/6G Wireless Systems with Linear Polarization. Saint Petersburg OPEN.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДНОГО ПОЛЯРИЗАТОРА С КЛИНОВИДНОЙ МАГНИТНОЙ СТЕНКОЙ

Машкова М.А.

*Московский технический университет
связи и информатики,
кафедра «Электроника»*

Аннотация

В работе проводится компьютерное моделирование волноводного поляризатора на основе клиновидной магнитной стенки из грибовидного метаматериала. С помощью программных средств CST Studio Suite получены диаграммы направленности излучения из открытого конца поляризатора на различных частотах.

Введение

Поляризация распространяющейся электромагнитной волны играет одну из важнейших ролей в радиосвязи, спутниковой связи, радиолокации и других областях науки и техники, позволяя эффективно принимать радиосигналы при известном законе изменения вектора электрического поля в пространстве. И современные темпы развития и модернизации микроволновых устройств, в том числе и поляризаторов электромагнитной волны, приводят к росту требований не только к их электродинамическим характеристикам, надежности, но и массогабаритным параметрам, простоте монтажа, прочности и износостойкости. Актуальность этой проблемы подтверждает ряд публикаций и патентов [1-4], посвященных разработке, компьютерному моделированию и экспериментальному исследованию различных моделей поляризаторов.

Одной из тенденций развития современных микроволновых устройств является внедрение в них структур на основе метаматериалов, что позволит добиться улучшенных электродинамических и массогабаритных характеристик.

В работе предлагается модель волноводного поляризатора, выполненная на основе отрезка прямоугольного волновода типа WR-284 с расположенной в нем клиновидной магнитной стенкой из грибовидного метаматериала. В ходе компьютерного модели-