

Применение листовых материалов на основе вспененного полистирола при построении отражательных антенных решеток

М.А. Боков

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

Аннотация: в статье предложен метод определения диэлектрических характеристик листовых материалов на основе пенополистирола (ППС). Проведены численное моделирование и натурный эксперимент по измерению управляющей характеристики элемента отражательной антенной решетки (ОАР) на подложке из ППС. Результаты демонстрируют возможность использования ППС в качестве диэлектрической подложки для ОАР, что открывает перспективы для создания интеллектуальных рассеивающих поверхностей (ИРП) с низкой стоимостью и высокой эффективностью.

Ключевые слова: пенополистирол, диэлектрическая проницаемость, отражательная антенная решетка, интеллектуальная рассеивающая поверхность, микрополосковый фильтр

1. Введение

Отражательные антенные решетки (ОАР) нашли широкое применение в радиолокации, навигации и системах связи. С развитием технологии интеллектуальных рассеивающих поверхностей (ИРП) актуальность исследований ОАР значительно возросла. ИРП позволяют управлять каналом передачи информации, повышая качество связи, особенно в условиях плотной городской застройки и внутри помещений [1], поэтому, например, шестое поколение беспроводных систем связи 6G подразумевает использование такого оборудования [2].

Одной из ключевых задач при создании ИРП является выбор доступных и эффективных материалов для отражающих поверхностей. ИРП способствует обеспечению нужных условий в канале связи за счёт управляемого создания переотражения части сигнала в сторону приёмника. При этом совместная работа отражательных элементов в составе панели обеспечивается в результате интерференции компонент сигнала, переотражённых элементами в определённых фазах [3, 4]. Для направления группового луча на подвижный приёмник или с подвижного передатчика требуется возможность изменения фазы переотражения каждым из элементов в широких пределах. Таким образом, материал подложки будем считать эффективным (подходящим для создания ИРП), если он обеспечивает такое управление.

Вспененный полистирол (ППС) представляет собой перспективный материал благодаря низкому тангенсу диэлектрических потерь (0,0002 – 0,0004 на частоте 10^6 Гц) [5] и доступности. Цель данной работы — исследование возможности использования ППС в качестве диэлектрической подложки для ОАР.

2. Методика определения диэлектрических характеристик

2.1. Теоретические основы

При распространении электромагнитной волны в среде с показателем преломления n длина волны уменьшается по сравнению с длиной волны в вакууме в n раз [6]. Для ППС относительная магнитная проницаемость $\mu \approx 1$, поэтому

относительная диэлектрическая проницаемость ε определяется соотношением:

$$\frac{\lambda_0}{\lambda} = n = \sqrt{\varepsilon\mu} \approx \sqrt{\varepsilon} \Rightarrow \varepsilon = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2, \quad (1)$$

где λ_0 – длина волны в вакууме, λ – длина волны в диэлектрике. Относительную диэлектрическую проницаемость определяют различными методами, среди которых своей точностью выделяются резонаторные методы [7]. Однако, калибровочные характеристики отличаются для различных резонансных структур (см., напр., [8]).

2.2. Экспериментальная установка

Для определения ε использовалась методика измерения резонансной частоты четвертьволнового режекторного фильтра [9], выполненного на подложке из ППС.

Конструкция и топология рассматриваемого фильтра представлены на рисунке 1.

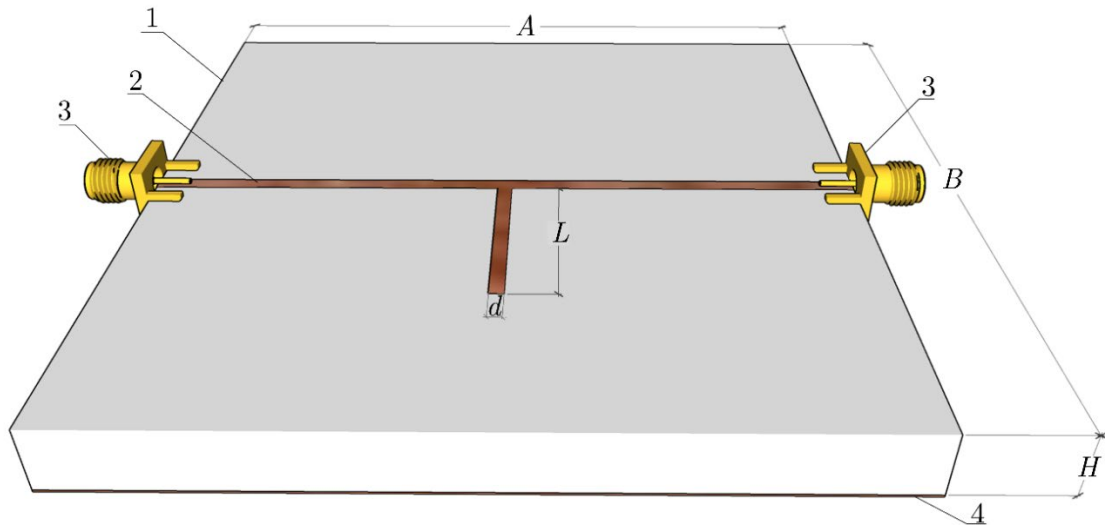


Рисунок 1. Конструкция и топология четвертьволнового микрополоскового фильтра.

Основой фильтра служит подложка 1 из листового материала на основе ППС, заключенного между двумя тонкими ($h = 0,5$ мм) слоями ПВХ, общая толщина подложки $H = 9$ мм. Длина и ширина подложки $A = B = 100$ мм.

На верхней поверхности нанесена медная микрополосковая линия 2 шириной $d = 2$ мм и толщиной $0,035$ мм, с отводом длиной $L = 25$ мм.

На концах линии установлены коаксиальные разъемы SMA 3.

Нижняя поверхность покрыта медным слоем 4 толщиной $0,3$ мм.

3. Анализ результатов

3.1 Численное моделирование

Чтобы установить зависимость относительной диэлектрической проницаемости от резонансной частоты фильтра, было выполнено численное моделирование предложенной структуры в пакете CST Studio Suite (students edition) при изменяющихся диэлектрических характеристиках (ε и $\text{tg}\delta$), результаты приведены на рисунке 2.

По оси абсцисс отложены значения соотношения длины волны в вакууме и в материале подложки:

$$\frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{\lambda_0}{4L} = \frac{c}{4fL}, \quad (2)$$

где c – скорость света в вакууме, f – резонансная частота фильтра, L – длина отвода микрополосковой линии. По оси ординат отложены значения относительной диэлектрической проницаемости, при которых получены соответствующие резонансные частоты.

Результаты численного моделирования путём решения электродинамической задачи во временной и частотной областях совпали, что подтверждает достоверность построенной модели. Также, анализируя график, можно отметить, что резонансная частота фильтра не зависит от значения тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$).

Таким образом, предложенный метод позволяет однозначно определить относительную диэлектрическую проницаемость материала.

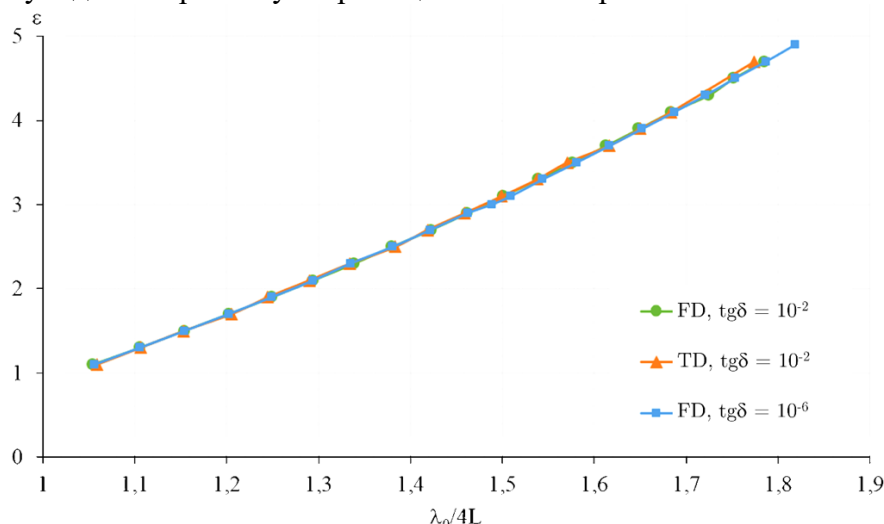


Рисунок 2. Зависимости относительной диэлектрической проницаемости от резонансной частоты фильтра полученные при численном моделировании в частотной (FD) и временной (TD) областях.

Путём аппроксимации результатов моделирования получена следующая аналитическая зависимость:

$$\varepsilon(\lambda_0) = 1,6476 \left(\frac{\lambda_0}{4L} \right)^2 + 0,2104 \frac{\lambda_0}{4L} - 0,941, \quad (3)$$

с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,9999$.

3.2. Экспериментальные данные

Для апробации предложенного метода измерения ε были отобраны два образца листового материала на основе пенополистирола разных производителей, из них изготовлены микрополосковые фильтры предложенной конструкции. С помощью векторного анализатора цепей измерены зависимости параметра S_{21} от частоты (рисунок 3).

По минимумам полученных графиков определены резонансные частоты, затем на основе формул (2) и (3) вычислены значения относительной диэлектрической проницаемости для образцов №1 и №2: $\varepsilon_1 = 1,6$ и $\varepsilon_2 = 1,8$ соответственно.

Анализируя полученные зависимости, стоит отметить, что характеристики образцов существенно отличаются, это необходимо учитывать при проектировании устройств на основе вспененного полистирола. Так как диэлектрические характеристики выпускаемых промышленностью материалов не регламентированы, образцы используемого материала должны подвергаться входному контролю с целью отсева заведомо неподходящих и корректировки топологии элементов ОАР для компенсации отклонения значения ε .

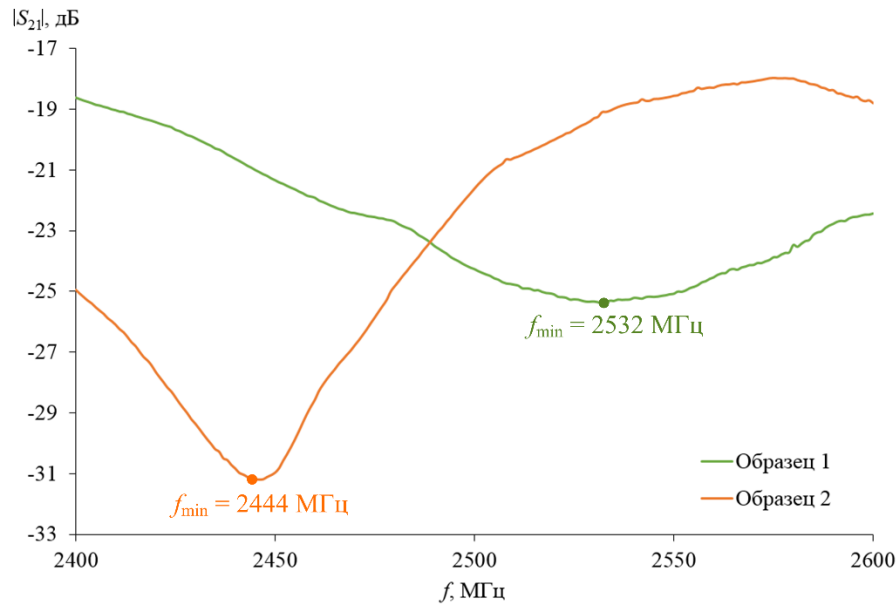


Рисунок 3. Зависимости параметра $|S_{21}|$ от частоты измеренные для фильтров на основе двух исследованных образцов вспененного полистирола.

4. Использование ППС для построения ОАР

В основе принципа работы ОАР лежит изменение фаз волн, отраженных отдельными элементами решетки. Таким образом, для подтверждения возможности построения ОАР на основе ППС была разработана конструкция элементарной ячейки на подложке из листового пенополистирола. На рисунке 4 представлена топология анализируемой ячейки и зависимость фазы коэффициента отражения от ёмкости управляющего элемента (варактора), полученная в результате численного моделирования в пакете CST Studio Suite (students edition) путём решения электродинамической задачи в частотной области. Устойчивость решения проверена повторным моделированием с измененными параметрами сетки на более узком диапазоне частот.

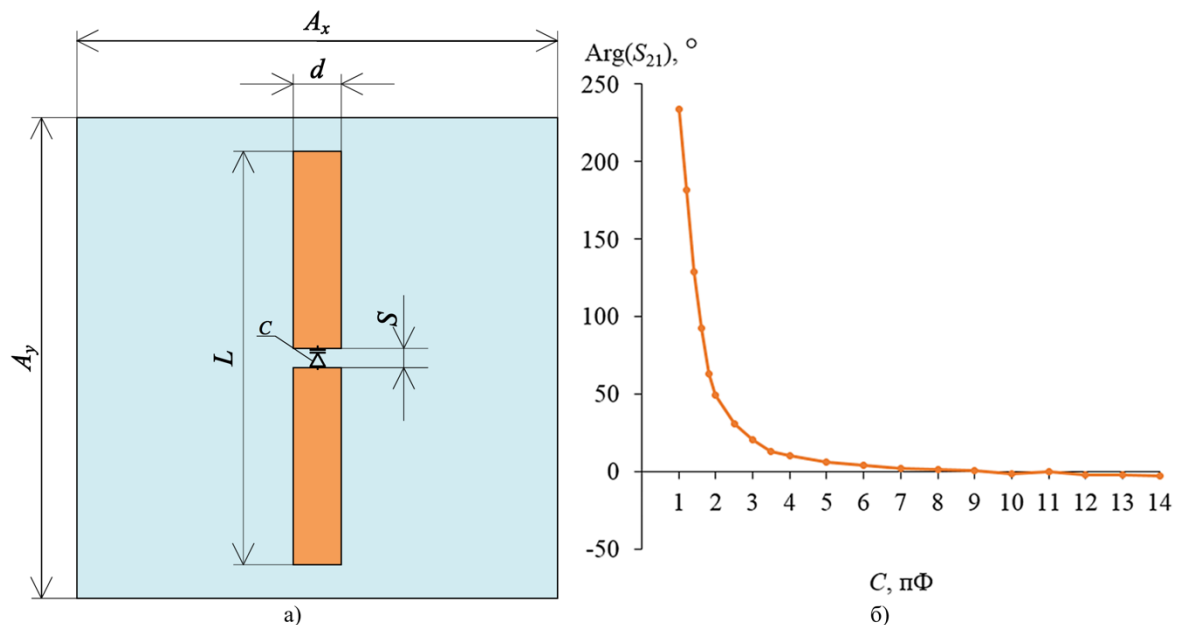


Рисунок 4. а) топология элементарной ячейки рассеивающей поверхности, б) зависимость фазы коэффициента отражения от ёмкости управляющего элемента

Результаты получены на частоте 2,45 ГГц, диапазон непрерывной регулировки фазы коэффициента отражения составил 236 градусов. В ряде работ [10], [11] показано, что возможно эффективное управление интеллектуальной рассеивающей поверхностью, элементы которой отражают волны с двумя дискретными сдвигами фазы 0° и 180°. Так как достигнутые с применением ППС результаты превышают указанные значения, то исследованная элементарная ячейка может быть использована для построения интеллектуальных рассеивающих поверхностей.

5. Заключение

Проведенные исследования подтвердили возможность использования пенополистирола в качестве диэлектрической подложки для ОАР. Однако необходимо проводить входной контроль диэлектрической проницаемости конкретных образцов, например, с использованием описанного метода.

Перспективы работы в области использования вспененного полистирола для ОАР включают оптимизацию технологии производства и состава ППС для стабилизации диэлектрических характеристик и разработку крупногабаритных интеллектуальных поверхностей на его основе.

Список литературы

1. Wu Q. et al. Intelligent surfaces empowered wireless network: Recent advances and the road to 6G //Proceedings of the IEEE. – 2024.
2. Wang C. X. et al. On the road to 6G: Visions, requirements, key technologies, and testbeds //IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2023. – Т. 25. – №. 2. – С. 905-974.
3. Pei X. et al. RIS-aided wireless communications: Prototyping, adaptive beamforming, and indoor/outdoor field trials //IEEE Transactions on Communications. – 2021. – Т. 69. – №. 12. – С. 8627-8640.
4. Liu Y. et al. Reconfigurable intelligent surfaces: Principles and opportunities //IEEE communications surveys & tutorials. – 2021. – Т. 23. – №. 3. – С. 1546-1577.
5. Трушкин А. Н. Химия и электрорадиоматериалы: учеб. пособие. – 2013.
6. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. – 1963.
7. Фомин Д. Г., Дударев Н. В., Даровских С. Н. Анализ методов измерения диэлектрических свойств материалов в СВЧ диапазоне длин волн //Журнал радиоэлектроники. – 2021. – №. 6.
8. Мигалин М. М., Обуховец В. А. Определение параметров фольгированных диэлектриков с помощью печатных структур //Известия ЮФУ. Технические науки. IZVESTIYA SFedU. ENGINEERING SCIENCES. – 2024. – №. 6.
9. Устройства СВЧ: Учеб. пособие / Под ред. Д. М. Сазонова. М.: Высшая школа. – 1981.
10. Dai L. et al. Reconfigurable intelligent surface-based wireless communications: Antenna design, prototyping, and experimental results //IEEE access. – 2020. – Т. 8. – С. 45913-45923.
11. Gros J. B. et al. A reconfigurable intelligent surface at mmWave based on a binary phase tunable metasurface //IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2021. – Т. 2. – С. 1055-1064.