



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.9.15>

УДК: 621.371.32

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДАВЛЕНИЯ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИМ МАТЕРИАЛОМ ПОБОЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ

Я.О. Гальцов

Таганрогский научно-исследовательский институт связи
347913, Таганрог, Ростовская обл., ул. Седова, д. 3

Статья поступила в редакцию 25 июня 2025 г.

Аннотация. В данной статье рассматривается вопрос распределения электромагнитных волн во внутреннем пространстве электрически герметичного корпуса. Описывается побочное излучение микрополосковой линии, его влияние на распространение сигнала. Анализируется влияние радиопоглощающего материала на поведение электромагнитного поля во внутреннем пространстве корпуса. Проводится электродинамическое моделирование СВЧ фильтра (расположенного в металлическом корпусе) и экспериментальное исследование, излучаемого им поля. Цель работы – описание влияния радиопоглощающего материала на поведение электромагнитных волн внутри корпуса и его влияние на характеристики.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, распределение поля, побочное излучение, микрополосковая линия, электродинамическое моделирование, СВЧ фильтр, радиопоглощающий материал.

Автор для переписки: Гальцов Ярослав Олегович, galcov-111yaroslav@mail.ru

Введение

Для многих современных радиоустройств, которым характерны высокие показатели чувствительности и разрешающей способности, требуется обеспечение максимально возможной электромагнитной совместимости. Для этого требуется контролировать и ограничивать радиопомехи, не только поступающие вместе с принимаемым или передающим сигналом, но и порождаемые внутри высокочастотного устройства. Такие помехи классифицируются по способу возникновения на собственный шум высокочастотных активных или реактивных компонентов (таких как микросхемы, дроссели и т.д.) и помехи линии передачи (таких как переотражения и побочное излучение).

В настоящее время, на фоне продолжающегося активного усовершенствования и одновременного массового распространения различных высокочастотных устройств и комплексов, а также улучшения их характеристик, задача снижения внутренних помех системы является одной из главных в процессе проектирования. При этом, столь же актуальна задача проработки новых принципов и методов снижения побочных помех.

В высокочастотной технике радиопоглощающие материалы (РПМ) активно применяются для снижения уровня эффективной площади рассеяния антенн и антенных решеток, комплексов и техники [1], для экранирования внутреннего пространства оборудования от внешних помех и широкополосного шума. Одним из примеров исследований в данной области выступает [2]. В этой работе рассматривается степень влияния толщины РПМ, расположенного у СВЧ фильтра, на характеристики передачи. Установлено, что от толщины материала зависят свойства среды и мощность поля вокруг связанной линии передачи.

Еще одно исследование использования РПМ приведено в [3]. В статье описывается способ подавления сверхширокополосных помех модальными искажениями, вносимыми с помощью РПМ, который располагается в поперечном сечении конструкции.

В [4] представлен метод улучшения характеристик модального фильтра. Полученные результаты демонстрируют возможность использования РПМ в устройствах защиты от сверхкоротких импульсов. Анализ поля в ближней зоне показал повышение затухания излучения в среднем на 9 дБ. Более того, наличие поглотителя не оказывает негативного влияния на модальные искажения сигнала.

Стоит отметить, что последние исследования о возможности применения РПМ в высокочастотных линиях направлены на борьбу с внешними помехами или используют РПМ как способ подстройки характеристик устройства. По этой причине, целью данной работы стало экспериментальное исследование возможности применения РПМ в качестве средства борьбы с побочным излучением высокочастотных линий передачи без искажения основной характеристики СВЧ фильтра, выполненного на поликоровой диэлектрической подложке.

ВК–100, активно применяемой в устройствах сантиметровом и миллиметровом диапазона длин волн и упомянутой в [5].

1. Особенности электромагнитного поля микрополосковой линии

На практике, для построения высокочастотных линий передачи в устройстве наиболее часто применяют микрополосковые и копланарные линии [6]. Их преимущества – это простая структура и относительно дешевое производства за счет одного слоя диэлектрического материала, не требующего прессования.

Микрополосковая линия (МПЛ) формируется разнесением планарных структур: проводящего верхнего слоя, диэлектрика и металлического экрана. Строение данного типа линии представлено на рис. 1.

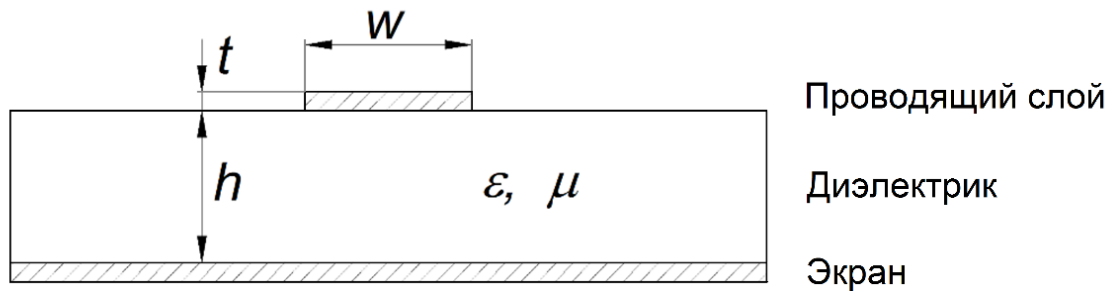


Рис. 1. Структура микрополосковой линии.

На рис. 1 принято: w – ширина проводника, t – толщина проводящего слоя, h – толщина диэлектрика, ε и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемость соответственно. Вдоль проводящей линии распространяется электромагнитная Т-волна, излучающая поле вокруг проводника в окружающем пространстве [7]. На плоскости металлического экрана, расположенного в непосредственной близости, наводятся противофазные электрические токи. С противоположной стороны от проводника экран отсутствует, из-за чего электромагнитное поле беспрепятственно распределяется в пространстве корпуса [8].

По этой причине, для расчета излучения МПЛ удобно использовать метод отражений. В первом приближении он позволяет представить линию передачи совокупностью диполей Герца в сферической системе координат [8].

$$E_{\theta,\phi} = -\frac{IW}{\lambda} \cdot \frac{e^{-jkR}}{R} \sin(\theta) \sin(kh \sin(\theta) \cos(\phi)), \quad (1)$$

где $E_{\theta,\phi}$ – напряженность электрического поля, I – амплитуда электрического тока, W – характеристическое сопротивление пространства, λ – длина волны, R – волновое сопротивление МПЛ, k – коэффициент распространения волны.

Мощность излучения можно рассчитать через сопротивления. Для этого необходимо получить формулы, выражающие характеристическое сопротивление излучения поля бегущей волны $R_{\text{бв}}$, поля стоячей волны $R_{\text{св}}$, и поля отрезка согласованной длинной линии $R_{\text{дл}}$ [8]

$$R_{\text{св}} = \pi W_0 \left(\frac{h}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{(2kl)^3 + 6(\sin(2kl) - 2kl)}{3(kl)^3}, \quad (2)$$

$$R_{\text{св}} = 2\pi W_0 \left(\frac{h}{\lambda} \right)^2, \quad (3)$$

$$R_{\text{дл}} = \frac{32\pi^3}{15} W_0 \left(\frac{lh}{\lambda^2} \right)^2, \quad (4)$$

где l – длина МПЛ, W_0 – характеристическое сопротивление свободного пространства.

Примем условие волнового сопротивления МПЛ $R = 50$ Ом. Учтем (2) – (4) в (1). В результате получим, что в свободное пространство над микрополосковой линией излучается приблизительно 17 % (для изучения бегущей волны), 0,5 % (для излучения стоячей волны), 2 % (для излучения отрезка согласованной длинной линии) от мощности сигнала, распространяющегося по проводнику.

Электромагнитные волны E и H типов, излучаемые МПЛ, оказываются в электрически закрытом объеме. На его стенках наводятся электрические токи, которые возбуждают объемный прямоугольный резонатор. Поле в нем характеризуется векторным потенциалом. Аппроксимируем излучающую линию элементарным излучателем, расположенным вдоль оси y . Тогда, с учетом касательных векторов поля к стенкам корпуса, требуется рассмотреть только вектор напряженности поля относительно оси y . Представим комплексную амплитуду векторного потенциала $\dot{A}_y$ в виде разложения в ряд Фурье с фиксированными поперечными координатами x и y , и распределением по оси z [7]

$$\dot{A}_y = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) q'_{ymnq} e^{-iq\pi z/l_p}, \quad (5)$$

где q'_{ymnq} – коэффициент разложения по оси y , a, b – стороны резонатора, m, n, q – коэффициенты (описывают число полуволн), l_p – длина резонатора.

С учетом граничных условий металлических стенок преобразуем выражение (5) [7]

$$\dot{A}_y = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} q_{ymnq} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \sin\left(\frac{q\pi}{l_p}z\right), \quad (6)$$

где $q_{ymnq} = -i2q'_{ymnq}$.

Переходя от комплексной амплитуды векторного потенциала (6) к векторам напряженности электромагнитного поля, получаем [7]

$$\vec{E}_z = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} \frac{1}{i\omega\epsilon} \cdot \frac{n\pi}{b} \cdot \frac{q\pi}{l_p} q_{ymnq} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \cos\left(\frac{q\pi}{l_p}z\right), \quad (7)$$

$$\vec{H}_z = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} \frac{m\pi}{a} q_{ymnq} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \sin\left(\frac{q\pi}{l_p}z\right), \quad (8)$$

где ω – частота электромагнитной волны.

Полученные уравнения (7) и (8) показывают, что составляющие магнитного поля зависимы от заполняемого объема, а точнее от вмещающих в его габариты числа полуволн. Следовательно, резонансная частота ω_{mnq} также зависит от размеров резонатора [7]

$$\omega_{mnq} = v_{\phi} \pi \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{q}{l_p}\right)^2}, \quad (9)$$

где $v_{\phi} = \sqrt{\epsilon\mu}$ – фазовая скорость.

Выражение (9) подразумевает, что для электромагнитной волны заданной частоты всегда существует такой объем, при котором будет наблюдаться эффект резонанса.

2. Внесение РПМ в корпус с распределяющимся электромагнитным полем

Для снижения влияния помехового сигнала предлагается использовать РПМ на основе композитной ферриторезиновой смеси (или иных составов). Они характеризуются определенными диэлектрическими и магнитными свойствами, которые обеспечивают снижение мощности электромагнитного

сигнала на установленное документацией значение за единицу объема поглотителя [9].

РПМ вносится в корпус устройства для решения задачи структурного разделения различных мод Е и Н типа с Т волной, а также их подавления, снижения мощности переотраженных волн, изменения условий возникновения явлений резонанса.

При этом в корпусе изменяется диэлектрическая и магнитная проницаемость среды, что приводит к изменению длины волны $\lambda_{\text{РПМ}} = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon\mu}}$.

Это ведет к изменению резонансной частоты. С учетом (9) получим закономерность $\omega_{mnq} = \frac{k_{mnq}}{\sqrt{\epsilon\mu}}$ [7], где k_{mnq} – коэффициент распространения мод электромагнитного поля.

Эти выражения показывает, что наличие материала с иными диэлектрическими и магнитными свойствами, относительно свободного пространства, приводит к изменению резонансной частоты. При этом, частичное заполнение внутреннего пространства корпуса РПМ создает многослойную структуру с различными диэлектрическими свойствами, которая нарушает волновое распределение поля внутри корпуса.

3. Экспериментальное исследование СВЧ фильтра с РПМ

Для исследования влияния РПМ на распространение электромагнитного поля был разработан СВЧ фильтр на основе подложки ВК–100. В САПР CST Design Environment построена модель, определены граничные условия – идеальные металлические поверхности, имитирующие металлический корпус, установлены излучающий порт 1 и приемный порт 2. Модель представлена на рис. 2.

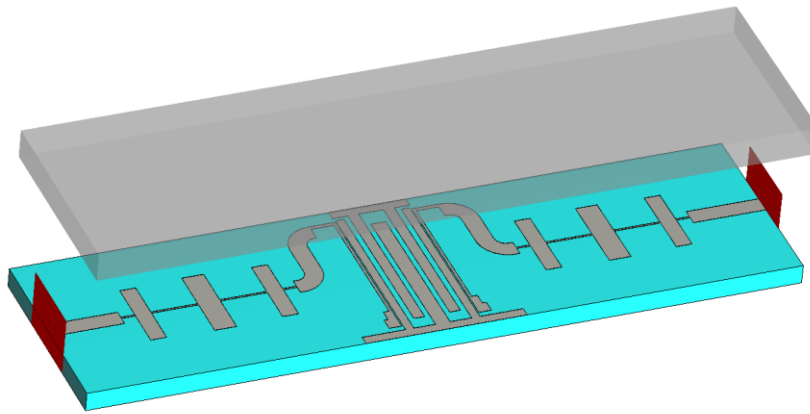
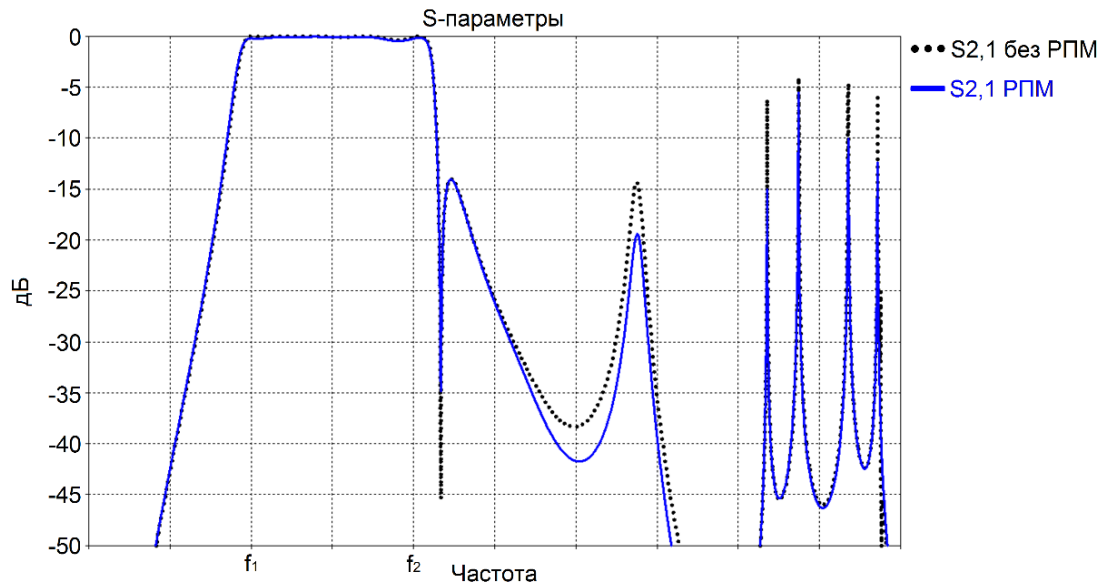


Рис. 2. Модель СВЧ фильтра с РПМ.

На рис. 3 представлены результаты электродинамического моделирования СВЧ фильтра в виде графиков S -параметров [7] в двух случаях: без РПМ во внутреннем пространстве корпуса и с его наличием.

Рис. 3. S -параметры СВЧ фильтра.

Для оценки мощности поля, излучаемой МПЛ, было установлено два плоских идеальных принимаемых порта между верхней металлической стенкой корпуса (крышкой) и листом РПМ около портов 1 и 2. По ширине они равны ширине платы (шириной считается размер, расположенный поперек линии), а их длина составила 4 мм. Результаты анализа ограниченной области пространства над СВЧ фильтром приведены на рис. 4 и 5.

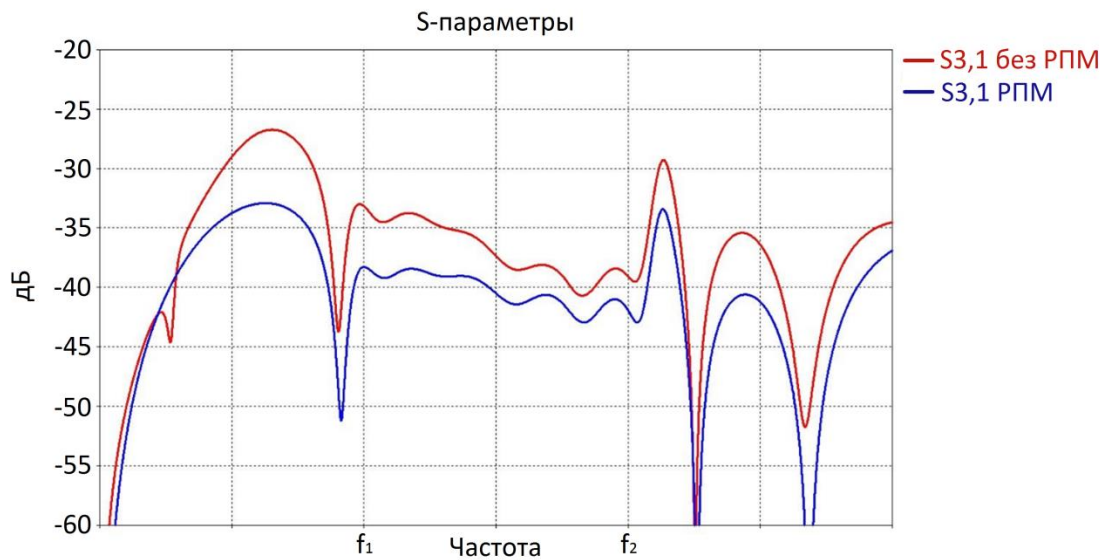


Рис. 4. S-параметры излучения МПЛ, когда приемный порт расположен над входом СВЧ фильтра.

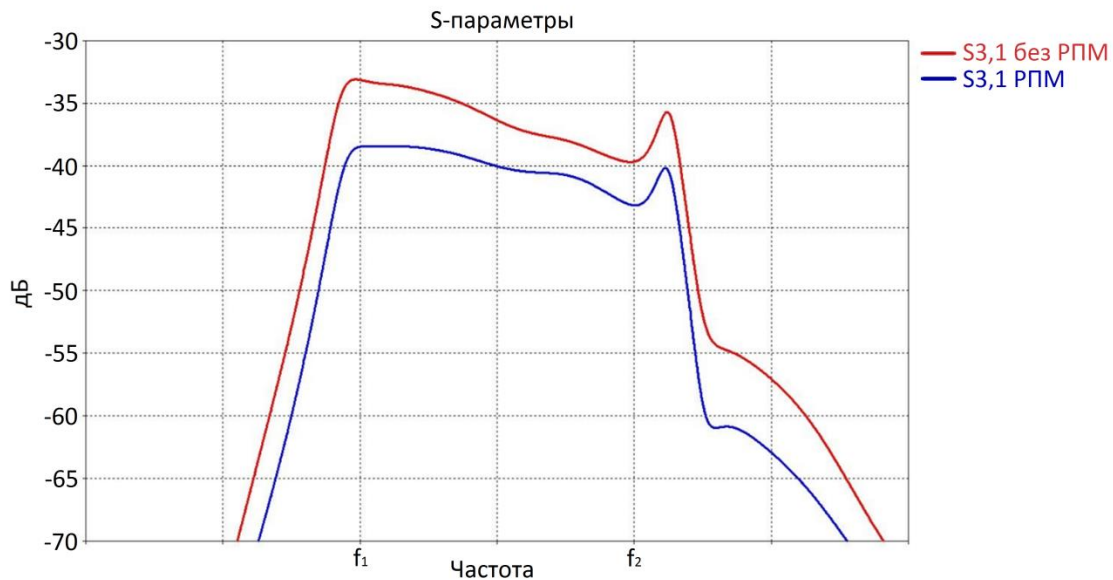


Рис. 5. S-параметры излучения МПЛ, когда приемный порт расположен над выходом СВЧ фильтра.

Анализ рис. 3 показал, что внесение в корпус высокочастотного устройства радиопоглощающего материала не приводит к ухудшению изначальной характеристики коэффициента передачи СВЧ фильтра.

Анализ рис. 4 и 5 показывает, что с выбранными параметрами РПМ мощность электромагнитного поля снижается больше, чем на 2 дБ без учета повторного подавления волны после переотражения от крышки. Также, форма поля отражает проходящую фильтрацию.

Заключение

Таким образом, исследование распределения поля, излучаемого микрополосковыми линиями, приводит к необходимости решения задачи подавления электромагнитных волн Е и Н типа. Анализ разработанной модели СВЧ фильтра с применением РПМ показал подавление волн минимум на 4 дБ (с учетом переотражения от крышки) и снижение уровня резонансов до 10 дБ. На основании результатов можно говорить, что использование РПМ для снижения внутренних помех высокочастотного устройства является действенным как для повышения стабильности и однозначности результатов, так и для повышения отношения сигнал/шум.

Благодарность: Автор выражает благодарность профессору Булычеву Юрию Гурьевичу, а также Шурховецкому Александру Николаевичу за полезные замечания и рекомендации, способствующие повышению качества подаваемого материала.

Литература

1. Вахитов М.Г. Применение радиопоглощающих покрытий для снижения эффективной поверхности рассеяния. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2015. – Т. 15. – № 1. – с. 139–144.
2. Trubcheninov V.A., Vlasov S.V., Yevgeniy S. Zhechev Y.S. The Influence of Electromagnetic Absorber Thickness on the Characteristics of the Filter based on Coupled Transmission Line. // 2024 IEEE 3rd International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE). 2024. <https://doi.org/10.1109/PIERE62470.2024.10804973>
3. Ivantsov I.A., Zhechev Y.S. Four-Layer Reflection-Symmetric Structure with Electromagnetic Absorber. // 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). 2022. <https://doi.org/10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017032>

4. Zhechev Y.S., Adnan A.Y., Malygin K.P. New Technique for Improving Modal Filter Performance by Using an Electromagnetic Absorber. // IEEE Access. 2022. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3199360>
5. Величко Р. Перспективные материалы подложек для применения в модулях СВЧ. // СВЧ Электроника. – 2016. – № 1. – с. 66 – 67.
6. Вольман В.И. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств. – М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.
7. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебник для вузов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2017. – 558 с.
8. Ладутенко А.С.; Черепанов А.С. Излучение микрополосковой линии. // XXXVI неделя науки СПбГПУ: материалы Всероссийской межвуз. науч.–техн. конф. студентов и аспирантов. Санкт-Петербург. – 2009. – Радиофизический факультет. – Ч. 6.
9. Латыпова А.Ф., Калинин Ю.Е. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов. // Вестник ВГТУ. – 2012. – № 6. – с. 70–76.

Для цитирования:

Гальцов Я.О. Исследование подавления радиопоглощающим материалом побочного излучения микрополосковой линии передачи // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.9.15>