

Научная статья
УДК 621.396.41
DOI: <https://doi.org/10.18127/j5604128-202402-04>

Комплексное исследование влияния дополнительных опорных проводников на характеристики полосковых устройств с модальным разложением на основе витка меандровой линии

Р.С. Суровцев¹, С. Карри², И.А. Скорняков³

¹⁻³ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (г. Томск, Россия)
¹ surovtsevrs@gmail.com, ² karrisalim.h@gmail.com, ³ ivan_sk94@mail.ru

Аннотация

Постановка проблемы. Обеспечение функциональной безопасности радиоэлектронных средств (РЭС) в условиях электромагнитных воздействий (ЭМВ) актуально в связи с уменьшением порога их восприимчивости из-за увеличения плотности монтажа печатных плат и граничных частот спектра используемых сигналов. Это ведет к тому, что РЭС становятся более уязвимыми к ЭМВ, а такие традиционные решения, как RLC-фильтры или газоразрядники не всегда способны обеспечить защиту от них. В связи с этим поиск и исследование новых решений для защиты РЭС не теряют актуальности. Внимания заслуживают полосковые устройства защиты от ЭМВ с модальным разложением, например, на основе одного витка меандровой линии (МЛ). Однако такое применение МЛ требует увеличения длины витка (до нескольких метров) даже при сравнительно малой длительности помехи. Поэтому актуален поиск путей к уменьшению их габаритов. Одним из них является сворачивание витка МЛ с сильной связью между проводниками в меандр со слабой связью между его полувитками. Подход ограничивается выбором оптимального расстояния между полувитками меандра, поскольку их избыточная близость может приводить к ухудшению модального разложения. Уменьшить расстояние можно за счёт размещения дополнительных опорных проводников между полувитками.

Цель. Выполнить комплексное исследование влияния дополнительных опорных проводников на характеристики полосковых устройств с модальным разложением на основе витка МЛ.

Результаты. Оценена с помощью численного моделирования возможность миниатюризации устройств. Подтверждено, что добавление дополнительных опорных проводников даёт возможность увеличить длину устройства на заданной исходной площади либо уменьшить размеры устройства на плате с сохранением защитных характеристик. Показан рост ослабления на примере импульсного воздействия в 1,3 раза.

Практическая значимость. Результаты исследования показывают возможности миниатюризации полосковых устройств с модальным разложением на заданной площади печатной платы с сохранением защитных характеристик.

Ключевые слова

Электромагнитная совместимость, радиоэлектронные средства, полосковые устройства, защита от электромагнитных воздействий, сверхширокополосное помеховое воздействие, целостность сигнала

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №19-79-10162 и гранта Президента МК-396.2022.4.

Для цитирования

Суровцев Р.С., Карри С., Скорняков И.А. Комплексное исследование влияния дополнительных опорных проводников на характеристики полосковых устройств с модальным разложением на основе витка меандровой линии // Электромагнитные волны и электронные системы. 2024. Т. 29. № 2. С. 30–43. DOI: <https://doi.org/10.18127/j5604128-202402-04>

A brief version in English is given at the end of the article

Введение

В настоящее время радиоэлектронные средства (РЭС) продолжают активно развиваться и используются повсеместно. В состав РЭС часто входят элементы, которые восприимчивы к электромагнитным помехам [1]. Поэтому при проектировании РЭС важно учитывать требования электромагнитной совместимости (ЭМС) [2, 3].

Одной из актуальных задач ЭМС является защита РЭС от сверхширокополосных (СШП) импульсных воздействий, которые за счёт широкого спектра могут проникать внутрь РЭС через щели в корпусе, минуя средства защиты, а за счёт высокой мощности выводить их из строя [4, 5]. Между тем существующие традиционные решения не всегда способны обеспечить защиту РЭС от СШП импульсных воздействий [6, 7]. Поэтому поиск и исследование новых устройств защиты не теряют актуальности.

© Суровцев Р.С., Карри С., Скорняков И.А., 2024

В качестве устройств защиты от импульсных электромагнитных воздействий (ЭМВ) и фильтрации сигналов могут применяться различные полосковые устройства [8–11]. Следует отметить подход, построенный на модальном разложении сигнала помехи на составляющие из-за различия скоростей их распространения в полосковых устройствах, на основе одного витка меандровой линии (МЛ) [12]. В самом простом случае подход позволяет разложить импульсное воздействие на *три основные составляющие (по амплитуде) во временной области*: перекрестную помеху и импульсы четной и нечетной мод. Это снижает степень влияния СШП импульсного воздействия на РЭС.

При проектировании устройств защиты на основе витка МЛ даже при малой длительности воздействия размеры устройств на плате довольно велики, что может быть препятствием для их применения в составе РЭС. Поэтому актуальна проработка подходов к уменьшению размеров устройств защиты с сохранением защитных свойств. Одним из таких подходов является сворачивание витка МЛ с сильной связью между сигнальными проводниками в меандр со слабой связью между его полувитками [13]. Методика ограничивается выбором оптимального расстояния между полувитками меандра, поскольку избыточная близость может приводить к ухудшению модального разложения [14]. Решением этой задачи является размещение между полувитками дополнительных проводников, соединенных с полигоном земли.

В результате предварительного исследования описанного подхода показана возможность уменьшения на 45% ширины устройства при общей длине витка 2,5 м [15]. Следующим шагом исследований является изготовление прототипов устройств с исходной и модифицированной (с дополнительным заземленным проводником) структурой, а затем измерение их характеристик в частотной и временной областях.

Цель работы – выполнить комплексное исследование влияния дополнительных опорных проводников на характеристики полосковых устройств с модальным разложением на основе витка меандровой линии.

Исследуемые структуры и методы их анализа

Представим исходную и модифицированную структуры витка, используемые в исследовании. Виток МЛ (его также называют С-секцией [16]) является парой связанных линий, закороченных на дальнем конце. В качестве исходной структуры принят виток, свернутый в меандр из 19 полувитков со слабой связью между неосновными витками. Пример поперечного сечения для произвольного числа проводников (N) представлен на рис. 1, а. Выбор $N=19$ вызван ограничением размеров прототипов, поскольку запланирована оценка излучаемых эмиссий с применением uTEM-камеры [17].

Согласно нормативным документам прототип на печатной плате размерами $100 \times 100 \text{ мм}^2$ с полигоном земли шириной 20 мм по периметру платы (для обеспечения электрического контакта с корпусом TEM-камеры) помещается внутри камеры [18]. Поэтому виток МЛ должен быть размещен на площади $80 \times 80 \text{ мм}^2$. Параметры поперечного сечения выбраны следующими:

- ширина сигнальных проводников $w = 0,3 \text{ мм}$;
- расстояние между сигнальными проводниками $s_1 = 0,2 \text{ мм}$;
- расстояние между неосновными витками $s_2 = 10w$.

В качестве подложки принят материал Arlon AD1000 толщиной 0,508 мм (толщина фольги $t = 18 \text{ мкм}$) с $\epsilon_r = 10,2 \pm 0,35$ и $\tan \delta = 0,0023$, измеренными при $f = 20 \text{ ГГц}$. Совокупность параметров обеспечивает согласование витка с трактом 50 Ом. Общая длина сигнального проводника при этом наборе параметров составила 2505 мм.

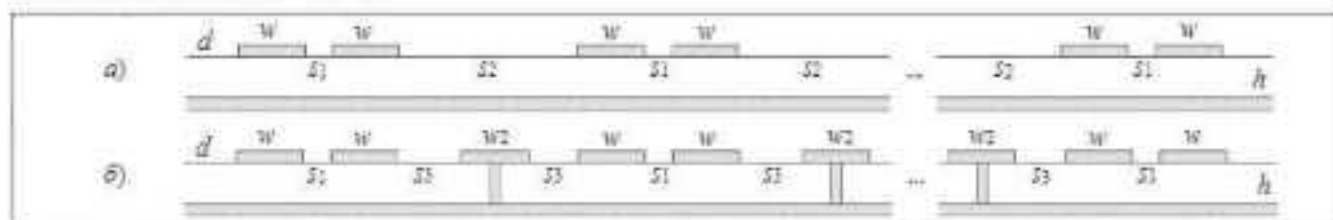


Рис. 1. Виды поперечного сечения исходной (а) и модифицированной (б) структур

Fig. 1. Views of the cross-section of the initial (a) and modified (b) structures

Рассмотрим модифицированную структуру. Для минимизации связи между несоседними витками, предложено разместить заземленные проводники шириной w_2 на расстоянии z_2 от соседних сигнальных проводников основного витка. Исходя из ранее выполненного исследования и параметрической оптимизации, выбран следующий оптимальный набор параметров [15] на том же основании для изготовления прототипа: $w = 0,3$ мм, $w_2 = 0,3$ мм, $z_1 = 0,2$ мм, $z_2 = 0,9$ мм. Этот набор обеспечивает общую длину сигнального проводника на заданной площади уже $l = 3257$ мм. Поперечное сечение модифицированного витка для произвольного N показано на рис. 1,б.

Представим разработанные прототипы устройств на основе исходной и модифицированной структур (рис. 2), которые для ясности будем называть прототип 1 и прототип 2. Для оценки достоверности результатов измерений прототипов дополнительно выполнено электродинамическое моделирование в пакете EMPro [19], в основе которого лежит метод конечных элементов (FEM) [20, 21]. Электродинамическое моделирование учитывает все типы волн, а его результаты наиболее близки к результатам измерений.



Рис. 2. Изготавливаемые прототип 1 (а) и прототип 2 (б)

Fig. 2. Manufactured prototype 1 (a) and prototype 2 (b)

Основой экспериментальных исследований полосковых устройств является измерение частотных зависимостей их S -параметров векторным анализатором цепей (ВАЦ). Схема экспериментальной установки показана на рис. 3,а. Для измерения необходимо:

- выполнить калибровку ВАЦ;
- подключить высокочастотные кабельные сборки к прототипу;
- измерить частотные зависимости S -параметров в выбранном частотном диапазоне;
- сохранить полученные данные в формате $s2p$ для возможности дальнейшего анализа, обработки и интерпретации результатов измерений.

Следует отметить, что возможность интеграции ВАЦ с персональным компьютером позволяет использовать измеренные частотные зависимости S -параметров для анализа во временной области. Это возможно благодаря тому, что файлы формата $s2p$ содержат значения, определяющие отношение спектральных переменных каждого порта, что и позволяет с их помощью вычислять временной отклик на воздействие произвольной формы, если его спектр лежит в измеренном диапазоне. Для этого могут быть использованы вычислительные возможности системы ADS [22], позволяющие избежать применения сложных измерительных установок, включающих генераторы разных воздействий и осциллографы.

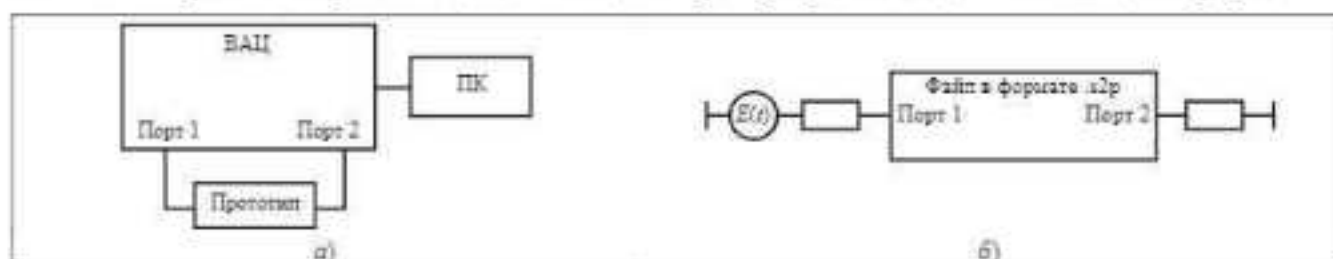


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для измерения S -параметров изготовленных прототипов (а) и анализа их характеристик во временной области (б)

Fig. 3. Experimental setup schematic diagrams for measuring S -parameters (a) of manufactured prototypes and for analyzing their characteristics in the time domain (b)

Выполним анализ прототипов во временной области согласно схеме, представленной на рис. 3,б, в три этапа:

На первом этапе для анализа необходимо:

импортировать частотные зависимости S-параметров в систему ADS в формате .s2p;

создать имитационную модель для вычисления временного отклика;

задать временной шаг и общий диапазон вычисления отклика;

вычислить отклик на воздействие (произвольное) и отобразить его с помощью графических средств системы;

оценить характеристики воздействия на выходе прототипа устройства (например, с помощью N-норм [23]).

N-нормы предложены для оценки пределов восприимчивости оборудования [24]. Однако они также применимы для оценки характеристик ЭМВ на входе и выходе устройств защиты. Для этого в качестве $U(t)$ используется форма помехового воздействия. В табл. 1 сведены параметры N-норм с указанием на применение каждой нормы.

Таблица 1. N-нормы для оценки характеристик помеховых воздействий

Норма	Название	Применение
$N_1 = U(t) _{\max}$	Пиковое (абсолютное) значение	Сбой схемы / электрический пробой / дуговые эффекты
$N_2 = \left \frac{\partial U(t)}{\partial t} \right _{\max}$	Пиковая (абсолютная) производная	Искрение компонента / сбой схемы
$N_3 = \left \int_0^t U(t) dt \right _{\max}$	Пиковый (абсолютный) импульс	Диэлектрический пробой (если U обозначает поле E)
$N_4 = \int_0^T U(t) dt$	Выпрямленный общий импульс	Повреждение оборудования
$N_5 = \sqrt{\int_0^T U(t) ^2 dt}$	Квадратный корень интеграла действия	Выгорание компонента

На втором этапе целесообразна оценка излучаемых эмиссий изготовленных прототипов. Эти измерения можно выполнить на базе четырехпортового ВАЦ и uTEM-камеры. Необходимость использования четырехпортового ВАЦ обусловлена тем, что к его портам одновременно подключаются и прототип устройства, и uTEM-камера. При этом полученные частотные зависимости коэффициентов передачи между uTEM-камерой и прототипом $|S_{12}|$ и $|S_{43}|$ отражают излучаемые помехоэмиссии прототипа.

Схема экспериментальной установки для измерений в uTEM-камере представлена на рис. 4.



Рис. 4. Схема экспериментальной установки для измерений в uTEM-камере

Fig. 4. Experimental setup schematic diagram for the measurements in uTEM-cell

На третьем этапе выполняется оценка целостности полезного сигнала. Одним из наиболее наглядных методов оценки является расчёт глазковых диаграмм, состоящих из суперпозиции временных откликов системы в пределах одного битового интервала при воздействии последовательности псевдо-случайных двоичных импульсов.

Результаты исследований в частотной области

На рис. 5 показан вид экспериментальных установок для измерения частотных зависимостей S -параметров прототипов. Для включения прототипов в тракт ВАЦ использованы коаксиально-микрополосковые переходы с вносимым затуханием менее 0,5 дБ в диапазоне частот 0–20 ГГц. В качестве ВАЦ использован E50771 С компании Agilent Technologies. Перед началом измерений выполнена SOLT-калибровка. Измерение S -параметров выполнено в диапазоне частот от 300 кГц до 20 ГГц. Для оценки излучаемых эмиссий к еще двум портам ВАЦ подключена uTEM-камера.



Рис. 5. Фото экспериментальных установок для измерения S -параметров на базе ВАЦ: в uTEM-клетке (а) и отдельно (б)
Fig. 5. Experimental setups for S -parameter measurements based on VNA: in uTEM-cell (a) and individually (b)

На рис. 6 приведены частотные зависимости $|S_{21}|$, полученные в результате измерений и моделирования прототипов 1 и 2. Видно, что зависимости имеют многорезонансный характер. Полоса пропускания по уровню минус 3 дБ для прототипа 1 (рис. 6,а) составила 62,7 МГц и 120 МГц по результатам измерений и моделирования, соответственно. Из рис. 6,б видно, что добавление дополнительных проводников привело к уменьшению полосы пропускания прототипа 2 до 50 МГц и 100 МГц при измерениях и моделировании, соответственно. Отметим хорошую согласованность результатов по характеру частотных зависимостей.

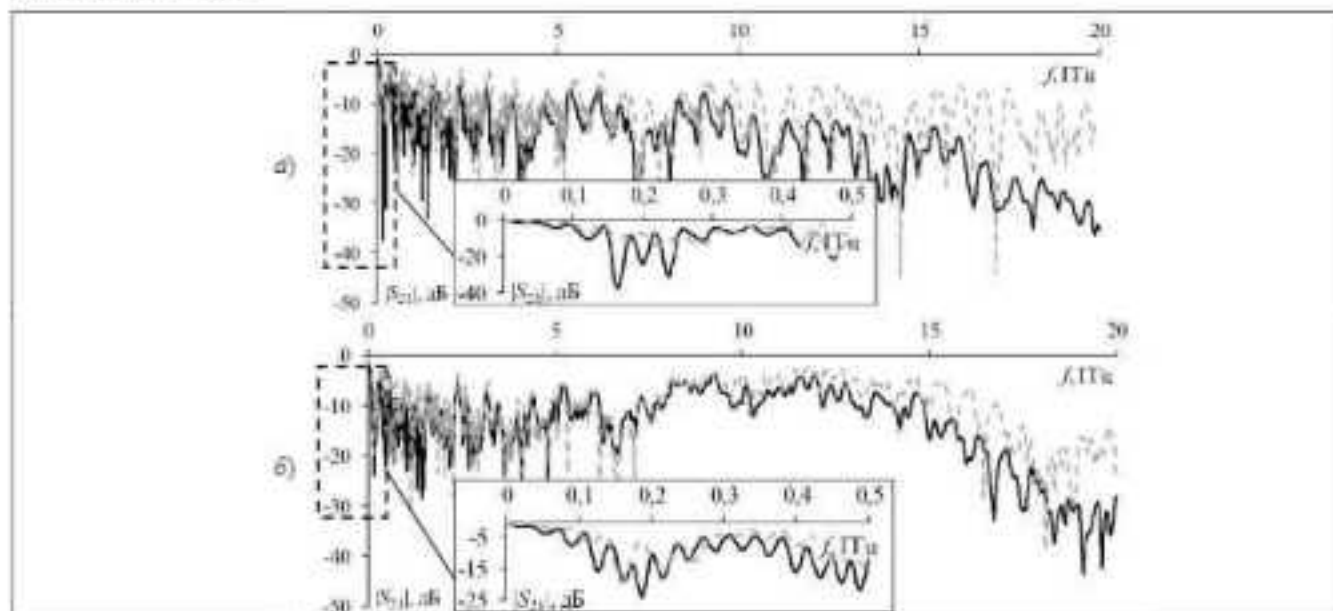


Рис. 6. Графики частотных зависимостей $|S_{21}|$ прототипа 1 (а) и прототипа 2 (б), полученные в результате измерений (—) и моделирования (---)

Fig. 6. Graphs of frequency dependencies $|S_{21}|$ for prototype 1 (a) and prototype 2 (b), obtained as a result of measurements (—) and simulation (---)

Основные количественные отличия наблюдаются по амплитуде резонансов, в особенности на высоких частотах. Различия результатов, полученных двумя способами, вероятно, вызвано неоднородностями из-за неидеальности прототипов, пайки соединителей и отражений, из-за расхождения импеданса прототипов с импедансом измерительного тракта. Несмотря на это, можно говорить о приемлемом совпадении результатов моделирования и измерений. Также отметим, что добавление дополнительных проводников приводит к увеличению количества резонансов из-за отражений, что ведет к уменьшению полосы пропускания. Это может быть препятствием для практического применения структуры.

Кроме того, получены частотные зависимости коэффициента передачи между прототипами и uTEM-камерой $|S_{21}|$, которые позволяют оценить излучаемые эмиссии от прототипов. Оценки выполнены при исходном положении прототипов внутри камеры и при их повороте на 90° . Результаты оценок для прототипов 1 и 2 показаны на рис. 7 и 8, соответственно.

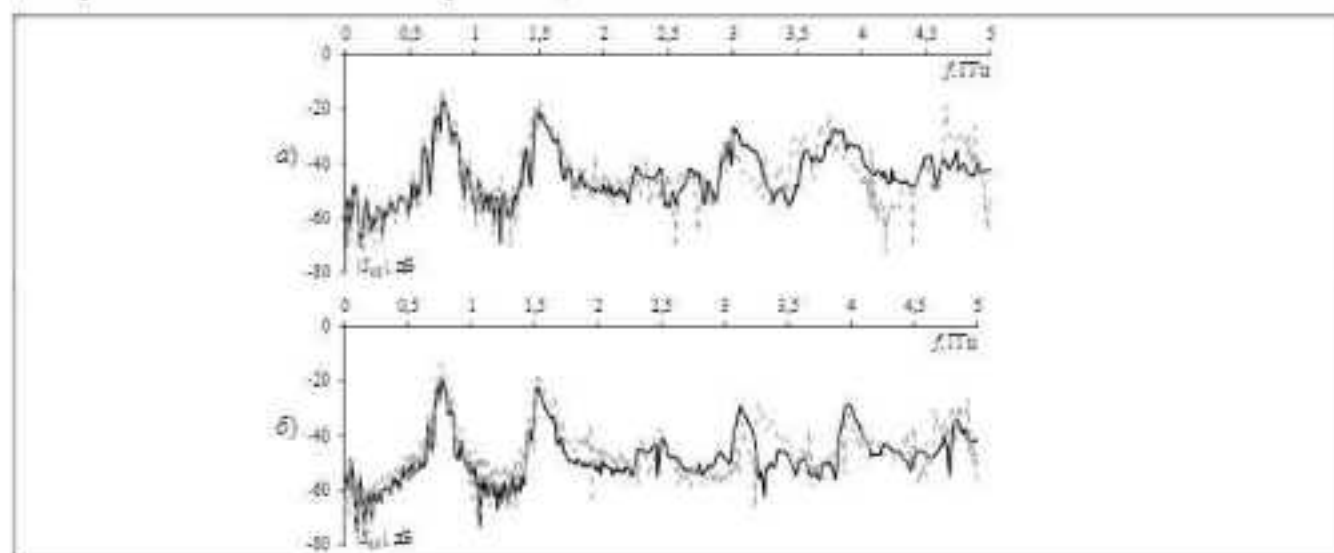


Рис. 7. Графики частотных зависимостей $|S_{21}|$ для прототипа 1 (а) и прототипа 2 (б), полученные в результате измерений (—) и моделирования (---), при исходном положении прототипов

Fig. 7. Graphs of frequency dependencies $|S_{21}|$ for prototype 1 (a) and prototype 2 (b), obtained as a result of measurements (—) and simulation (---), at the initial position of the prototypes

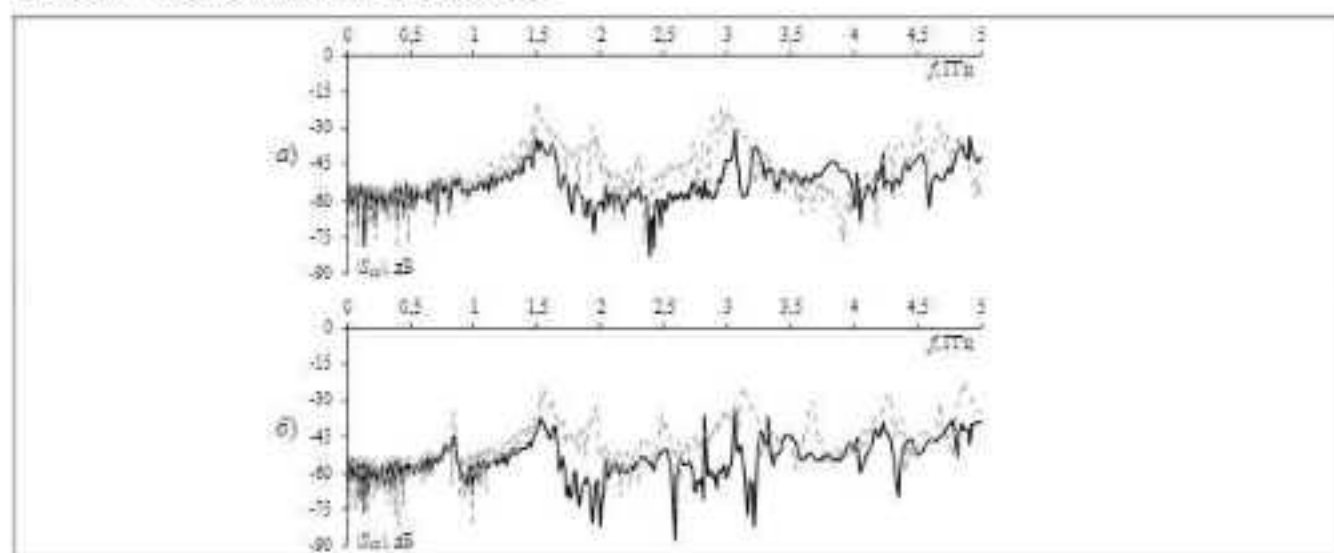


Рис. 8. Графики частотных зависимостей $|S_{21}|$ для прототипа 1 (а) и прототипа 2 (б), полученные в результате измерений (—) и моделирования (---), при повороте прототипа на 90°

Fig. 8. Graphs of frequency dependencies $|S_{21}|$ for prototype 1 (a) and prototype 2 (b), obtained as a result of measurements (—) and simulation (---), when the prototype is rotated by 90°

По данным на рис. 7 видно, что частотные зависимости, полученные разными методами, при исходном положении прототипов внутри камеры хорошо согласуются по форме. Однако наблюдаются отличия амплитуд и частот резонансов, причем с ростом частоты отличия возрастают. Отличия результатов при повороте прототипов на 90° наблюдается, как по форме, так и по частотам и амплитудам резонансов. Их причины однозначно объяснить сложно. Наилучшее согласование выявлено для прототипа 1. При исходном положении прототипа наблюдается рост коэффициента $|S_{43}|$ в частотных областях 0,7–1 ГГц и 1,5–1,7 ГГц. Наибольшее значение $|S_{43}|$ составило – 13,4 дБ на частоте 764 МГц и минус 19,7 дБ на частоте 795 МГц по результатам моделирования и измерений, соответственно.

При повороте на 90° относительно центрального проводника иТЕМ-камеры средний уровень зависимостей падает во всем частотном диапазоне, а области с более высоким коэффициентом передачи смещаются вверх по частоте (в диапазоны 1,5–1,8 ГГц и 3–3,3 ГГц). Схожие результаты наблюдаются и для прототипа 2, но отличия зависимостей, полученных разными методами, менее существенны при исходном положении прототипа, а при повороте на 90° – наоборот. Максимум $|S_{43}|$ для прототипа 2 практически не изменился и составил минус 14 дБ на частоте 18,9 ГГц по результатам измерений (для прототипа 1 минус 14,45 дБ на частоте 13,53 ГГц по результатам измерений). Это говорит о том, что добавление дополнительных проводников в структуру мало влияет на максимальный уровень излучаемых эмиссий, но смещает его вверх по частоте. Несмотря на это, необходимо учитывать, что распространение сигналов на резонансных частотах может приводить к значительным уровням излучаемых эмиссий.

Результаты исследований во временной области

Выполнено электродинамическое моделирование и измерение прототипов во временной области в соответствии со схемой на рис. 3,б. Для этого осуществлен импорт измеренных частотных зависимостей S -параметров прототипов в систему ADS. Сначала в качестве воздействия принят импульсный сигнал в виде трапеции с амплитудой э.д.с. 1 В и длительностью 900 пс. Формы напряжения на выходе прототипов, полученные разными методами, показаны на рис. 9.

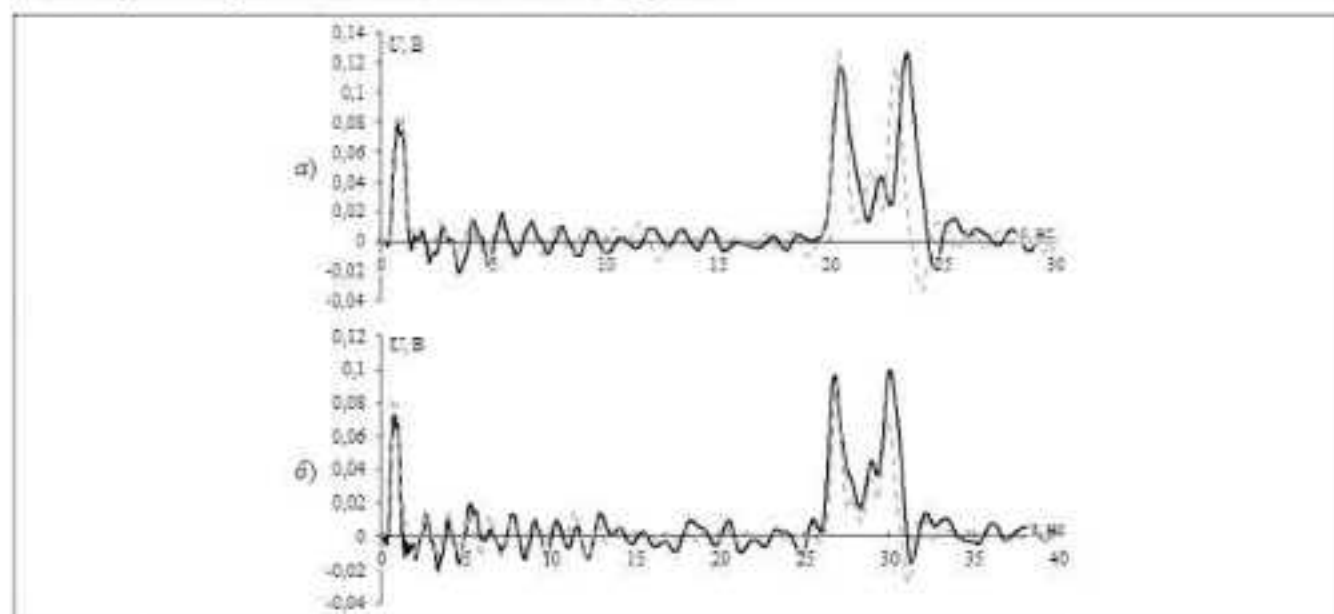


Рис. 9. Графическое представление форм напряжения на выходе прототипа 1 (а) и прототипа 2 (б), полученные в результате измерений (—) и моделирования (---), при воздействии импульсным сигналом

Fig. 9. Voltage waveforms at the output for prototype 1 (a) and prototype 2 (b) for the pulse excitation, obtained as a result of measurements (—) and simulation (---)

Прежде всего следует отметить хорошую согласованность результатов измерений и моделирования. Из представленных форм напряжений видно, что на выходе каждого прототипа импульсный сигнал раскладывается на последовательность из трех основных импульсов меньшей амплитуды. Между импульсами перекрестной помехи и нечетной мод (импульсы 1 и 2) наблюдается много отраженных со-

ставляющих основного сигнала. Между импульсами мод (2 и 3 импульсы) наблюдается импульс, который также является результатом наложения отраженных составляющих на фронт и спад импульсов мод, из-за чего имеет сравнительно высокую амплитуду. Также отметим то, что из-за влияния потерь более поздние составляющие имеют сглаженную форму. Ослабление сигнала за счёт разложения на составляющие на выходе прототипов определяется амплитудой импульса чётной моды и для прототипа 1 составляет 3,97 раза, а для прототипа 2, соответственно, – 5 раз.

Таким образом, дополнительные проводники приводят к росту ослабления в 1,3 раза по сравнению с исходной структурой. Кроме того, следует отметить, что из-за увеличения общей длины проводника увеличивается задержка импульсов мод, а также влияние потерь, что нужно учитывать на практике. Для более детального сравнения форм напряжения, на выходе прототипов вычислены и сведены в табл. 2 N -нормы исходного воздействия и результата его разложения на выходе прототипов 1 и 2 (только по результатам измерений).

Таблица 2. Вычисленные N -нормы при импульсном воздействии

Источник данных	N_1	$N_2 \times 10^{-4}$	$N_3 \times 10^{12}$	$N_4 \times 10^{20}$	$N_5 \times 10^7$
Входное воздействие	0,500	1,83	3	3	1,12
На выходе прототипа 1	0,126	0,403	3,16	4,50	0,496
На выходе прототипа 2	0,099	0,488	2,98	4,82	0,450

Результаты табл. 2 подтверждают сделанные ранее выводы. Видно, что норма N_1 , по сравнению с воздействием на входе, уменьшается в 4 и 5 раз на выходе прототипов 1 и 2, соответственно. Уменьшенные нормы N_2 также довольно существенно и для прототипов 1 и 2 составляет 4,54 и 3,75 раза, соответственно. Её увеличение на выходе прототипа 2 связано с более крутыми фронтами составляющих. Также отметим рост N_3 и N_4 , который связан с появлением большого количества отражений, а также влиянием потерь на сглаживание формы составляющих, из-за чего происходит увеличение их ширины и наложение друг на друга. Их наложение также приводит к слабому уменьшению N_5 . Полученные результаты позволяют утверждать, что добавление дополнительных проводников даёт возможность уменьшения размеров полоскового устройства на плате с приемлемым сохранением защитных характеристик либо увеличения длины устройства на заданной площади.

Дополнительно рассмотрено разложение на выходе прототипов затухающей синусоиды с центральной частотой 1 ГГц и коэффициентом затухания 10^9 [25], представленное на рис. 10.

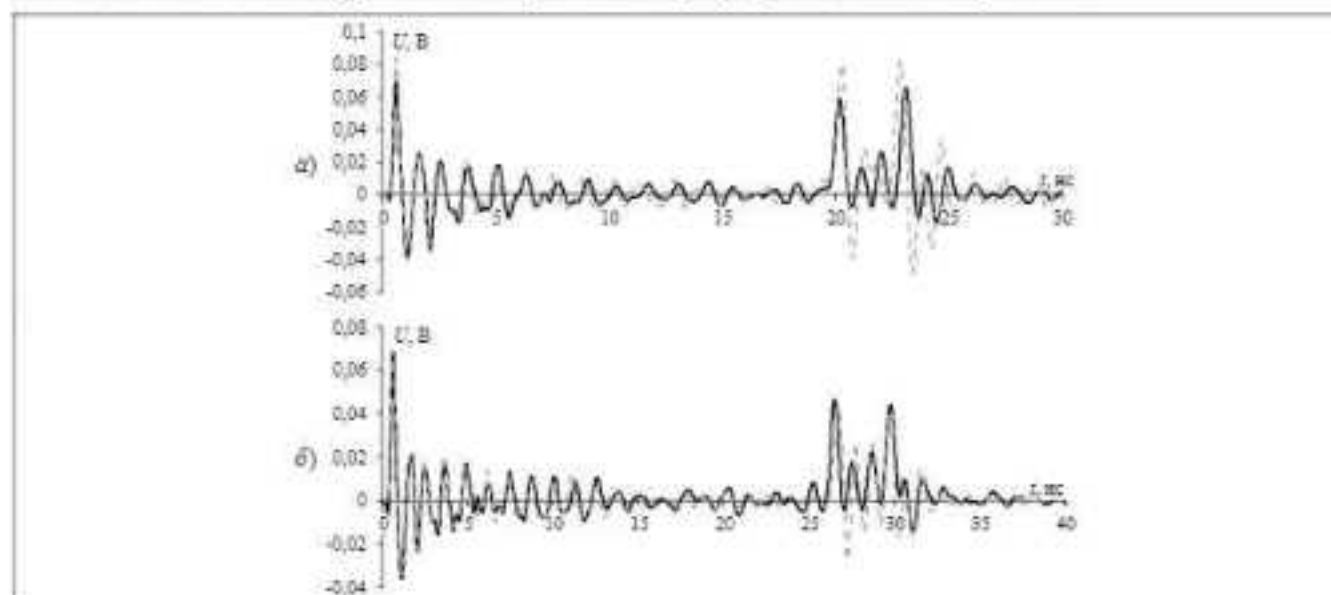


Рис. 10. Графическое представление формы напряжения на выходе прототипа 1 (а) и прототипа 2 (б), полученные в результате измерений (—) и моделирования (---), при воздействии затухающей синусоиды

Fig. 10. Voltage waveforms at the output for prototype 1 (a) and prototype 2 (b) for the pulse excitation, obtained as a result of measurements (—) and simulation (---)

Видно, что затухающая синусоида также раскладывается на составляющие. Из-за большей длительности влияние отраженных составляющих не столь явное. Формы напряжения, полученные разными методами, также хорошо согласуются между собой. Ослабление воздействия определяется пиковой амплитудой перекрестной наводки. Поэтому выявлено одинаковое ослабление на выходе прототипов, которое составило 7,15 раза. Между тем ослабление основных составляющих в среднем выше в 1,5 раза. Это может быть связано с более выраженными потерями из-за увеличения общей длины проводника витка МЛ.

Оценка целостности сигналов

Для оценки целостности цифровых сигналов измерены глазковые диаграммы при прохождении по прототипам псевдослучайной двоичной битовой последовательности со скоростями 10 Мбит/с, 100 Мбит/с и 150 Мбит/с. На рис. 11 представлен температурный вид трехмерных глазковых диаграмм. Глаза автоматически центрируются и отображаются на $2T$ по горизонтальной оси. Цвета глазковой диаграммы указывают на частоту пересечений одной и той же точки в плоскости время-напряжение. Более частые пересечения характеризуются светлыми оттенками, а редкие – темными. Для наглядности и возможности сравнения, на основе результатов моделирования оценены контуры вероятности постоянной ошибки и наложены на измеренные глазковые диаграммы в виде BER-контура. Дополнительно к графическому представлению глазковых диаграмм оценены их основные параметры по результатам измерений и сведены в табл. 3.

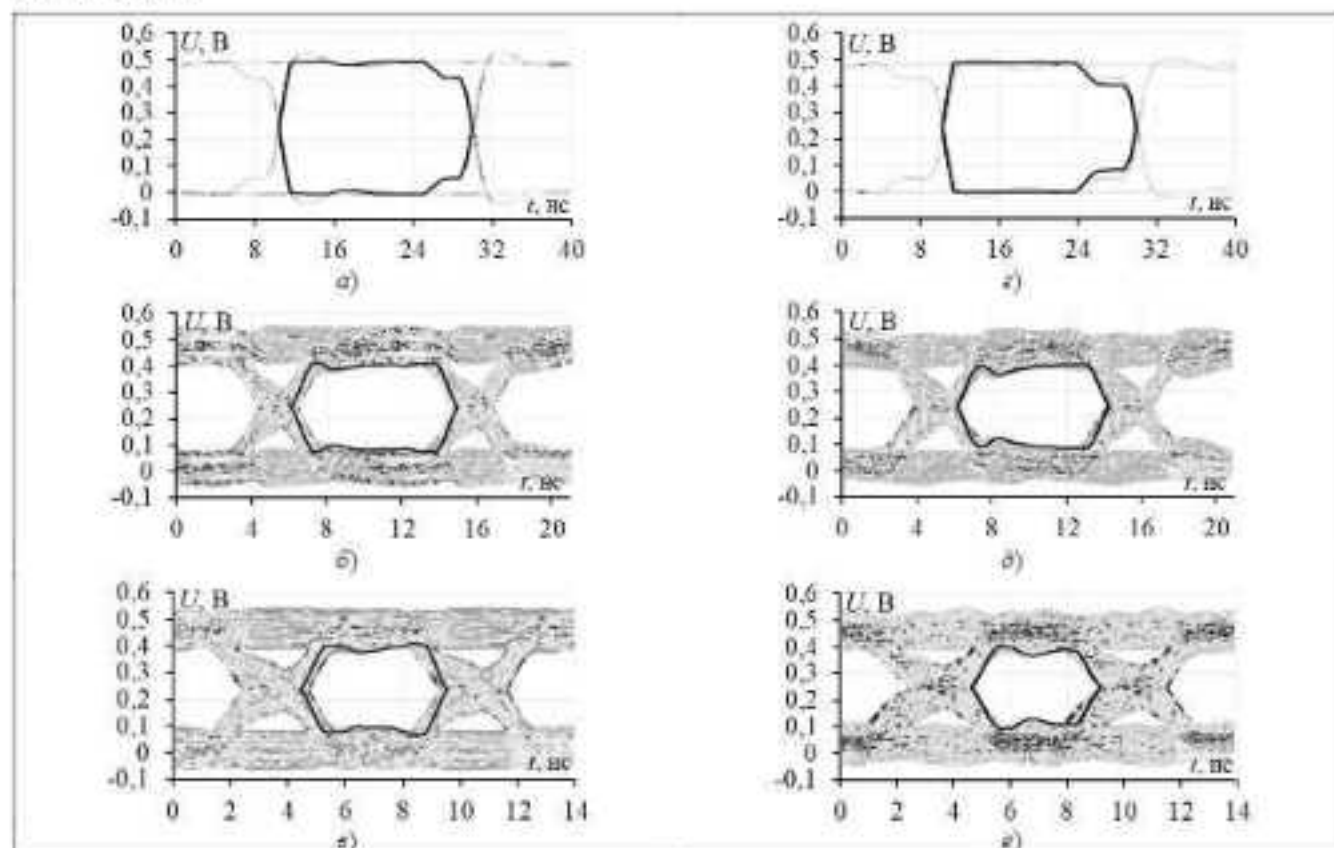


Рис. 11. Глазковые диаграммы для прототипа 1 (а-с) и прототипа 2 (d-f), полученные в результате измерений (—) и моделирования (---), при скоростях передачи данных 10 Мбит/с, 100 Мбит/с и 150 Мбит/с

Fig. 11. Eye diagrams for prototype 1 (a-c) and prototype 2 (d-f), obtained as a result of measurements (—) and simulations (---), for data rates of 10 Mbps, 100 Mbps and 150 Mbps

Результаты моделирования и измерений хорошо согласуются, что можно заметить на рис. 11, однако наблюдаются различия, как по времени, так и амплитуде. Между тем, даже при скорости 150 Мбит/с «глаз» остается открытым, что говорит о довольно низкой вероятности появления битовых ошибок.

Таблица 3. Параметры цифрового сигнала на выходе прототипов 1 и 2

Измеряемые параметры	Скорость, Мбит/с					
	10		100		150	
	Прототип 1	Прототип 2	Прототип 1	Прототип 2	Прототип 1	Прототип 2
Высота «глаза», мВ	460	444	310	265	279	263
Ширина «глаза», нс	9,9	10	8	7,88	4,55	4,52
Отношение сигнал/шум	47,25	33,28	5,89	6,62	5,96	5,93
Фазовое дрожание, пс	<1	<1	61,46	31,23	61,84	32,22

Из анализа результатов табл. 3 также видно, что прототипы обеспечивают приемлемую передачу данных при всех рассмотренных скоростях. Наилучшая передача наблюдается при скорости 10 Мбит/с, причем при такой передаче фазовое дрожание для каждого из прототипов отсутствует. Увеличение скорости приводит к уменьшению высоты «глаза», а также увеличению соотношения сигнал/шум и фазового дрожания. Также отметим, что получены близкие значения отношения сигнал/шум и фазового дрожания для каждого прототипа при скоростях 100 Мбит/с и 150 Мбит/с. Добавление дополнительных проводников в структуру прототипа приводит к незначительному уменьшению раскрытия «глаза», но при этом и к уменьшению фазового дрожания. Таким образом, с точки зрения целостности сигналов прототип 2 обеспечивает лучшую передачу цифровых сигналов.

Заключение

Представлены результаты комплексного исследования влияния дополнительных опорных проводников на характеристики полосковых устройств с модальным разложением на основе витка МЛ. Для этого изготовлены два прототипа устройств с исходной и модифицированной структурами. Добавление дополнительных проводников позволило уменьшить связь между сигнальными проводниками устройства, за счёт чего удалось на фиксированной площади (80×80 мм) разместить устройство с общей длиной сигнального проводника 3257 мм (при длине проводника исходной структуры 2505 мм). Для возможности сопоставления подтверждения корректности результатов выполнено измерение и электродинамическое моделирование в частотной и временной областях. Выявлена хорошая сходимость результатов, полученных разными методами.

В результате анализа разработанных прототипов в частотной области выявлено, что добавление дополнительных проводников приводит к увеличению количества резонансов из-за отражений, что ведет к уменьшению полосы пропускания (с 62,7 до 50 МГц по результатам измерений). Это может послужить препятствием для практического применения структуры в более высокоскоростных цепях. В результате анализа прототипов в uTEM-камере показано, что добавление дополнительных проводников в структуру не оказывает существенного влияния на максимальный уровень излучаемых эмиссий, но приводит к его смещению в область более низких частот. Несмотря на это, необходимо учитывать, что распространение сигналов на резонансных частотах может приводить к значительным уровням излучаемых эмиссий.

Анализ во временной области выполнен на примере импульсного воздействия с длительностью 900 пс. В результате выявлено, что ослабление сигнала за счёт разложения на составляющие на выходе прототипов определяется амплитудой импульса чётной моды и для прототипа 1 составляет 3,97 раза, а для прототипа 2, соответственно, – 5 раз. Таким образом, добавление дополнительных проводников в структуру приводит к увеличению ослабления в 1,3 раза по сравнению с исходной структурой. При этом на ослабление амплитуды также оказывают большее влияние потери в проводниках и диэлектриках за счёт увеличения общей длины сигнального проводника. Вычисленные N -нормы по результатам измерений подтвердили сделанные выводы. Для анализа распространения других форм воздействия рассмотрено разложение затухающей синусоиды с ослаблением 7,15 раза, определяемое амплитудой перекрестной помехи.

Выполнена оценка целостности цифровых сигналов. Для этого измерены глазковые диаграммы при прохождении по прототипам псевдослучайной двоичной битовой последовательности. Выявлено, что наилучшая передача наблюдается при скорости 10 Мбит/с, при этом фазовое дрожание для каждого из прототипов отсутствует. Увеличение скорости приводит к уменьшению высоты «глаза», а также увеличению соотношения сигнал/шум и появлению фазового дрожания. Для скоростей 100 Мбит/с и 150

Мбит/с выявлено, что добавление дополнительных проводников приводит к незначительному уменьшению раскрытия «глаза», но при этом уменьшению фазового дрожания. Поэтому, с точки зрения целостности сигналов прототип 2 обеспечивает лучшую передачу цифровых сигналов.

Таким образом, комплекс полученных результатов показал, что добавление дополнительных проводников даёт возможность увеличения длины устройства на заданной исходной площади. Другим результатом этого является уменьшение размеров устройства на плате с сохранением защитных характеристик.

Список источников

1. Сидоров А.В., Бокоев О.И., Хохлов Н.С. Электромагнитный терроризм как источник угроз инфокоммуникационным системам связи и управления // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2014. № 13. С. 106–109.
2. *Glavni L. EMC in power electronics*. N.J.: IEEE Press. 1995. 415 p.
3. ГОСТ Р 51318.11–2006. Совместимость технических средств электромагнитная. Промышленные, научные, медицинские и бытовые (ПНМБ) высокочастотные устройства. Радиопомехи промышленные. Нормы и методы измерений. М.: Стандартинформ. 2007. 39 с.
4. Саваров К.Ю., Соколов А.А., Михеев О.В., Туркин В.А., Корнев А.Н., Долбин С.Н., Певнев А.В. Исследование функционирования локальной вычислительной сети в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов // Технологии электромагнитной совместимости. 2006. № 3(18). С. 36–40.
5. *Гизатуллин Э.М. Промоустойчивость средств вычислительной техники внутри зданий при широкополосных электромагнитных воздействиях*. Казань: Издательство КГТУ. 2012. 254 с.
6. *Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference // Journal of Communications Technology and Electronics*. 2016. V. 61. № 5. P. 546–550. DOI 10.1134/S1064226916050053.
7. Mora N., Vega F., Lugrin G., Rachidi F., Rubinsteyn M. Study and classification of potential IEMP sources // System and assessment notes. 2014. № 41. P. 92.
8. Weber T., Krzikalla R., Ter Haseborg L. Linear and nonlinear filters suppressing UWB pulses // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2004. V. 46. № 3. P. 423–430. DOI 10.1109/TEMC.2004.831887.
9. Krzikalla R., Luitzen J., Ter Haseborg L. Systematic description of the protection capability of protection elements // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Honolulu, USA. 2007. P. 1–5. DOI 10.1109/IEMC.2007.177.
10. *Cui Q., Dong S., Han Y. Investigation of waffle structure SCR for electrostatic discharge (ESD) protection // IEEE International Conference on Electron Devices and Solid State Circuit*. Bangkok, Thailand. 2012. P. 1–4. DOI 10.1109/EDSSC.2012.6482791.
11. Hayashi H., Kuroda T., Kato K., Fukuda K., Baba S., Fukuda Y. ESD Protection Design Optimization Using a Mixed-Mode Simulation and Its Impact on ESD Protection Design of Power Bus Line Resistance // International Conference On Simulation of Semiconductor Processes and Devices. Tokyo, Japan. 2005. P. 99–102. DOI 10.1109/SISPAD.2005.201482.
12. Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotny A.M., Gazitov T.R. Possibility of protection against UWB pulses based on a turn of a meander microstrip line // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2017. V. 59. № 6. P. 1864–1871. DOI 10.1109/TEMC.2017.2678019.
13. Surovtsev R.S., Nosov A.V., Gazitov T.R. Comparison of time responses of a meander line turn to ultrashort pulse excitation // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2022. V. 64. № 4. P. 1265–1269. DOI 10.1109/TEMC.2022.3162640.
14. Скорняков И.А., Суровцев Р.С. Анализ влияния ширины разветвляющей трассы на амплитуду перекрестных наводок в связанной двухпроводной линии // Сборник избранных статей междунар. науч.-технич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2021». Томск, Россия. 2021. Ч. 2. С. 86–91.
15. Суровцев Р.С., Скорняков И.А., Карри С. Миниатюризация устройства на основе вьтка мезандровой линии с помощью дополнительных заземленных проводников // Доклады ТУСУР. 2022. Т. 25. № 3. С. 14–20.
16. Селезнев Э.В., Мамичкин А.Н., Матвеев Н.Д. Особенности импульсных последовательностей, формируемых фазовыми фильтрами на основе С-секций с периодической характеристикой группового времени запаздывания // Радиотехника. 2006. № 6. С. 27–30.
17. Demakov A.V., Komutnov M.E. TEM cell for Testing Low-profile Integrated Circuits for EMC // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. 2020. P. 154–158. DOI 10.1109/EDM49804.2020.9153508.
18. IEC 62132-2 Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Immunity. Part 2. Measurement of Radiated Immunity, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method. First Edit. 2010.
19. PathWave Advanced Design System. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.keysight.com/us/en/products/software/pathwave-design-software>, дата обращения 05.04.2023.
20. Селерланд Л. Приложение метода конечных элементов. М.: Мир. 1979. 392 с.
21. Зехлемен О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир. 1975. 541 с.
22. PathWave EM Design. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.keysight.com/us/en/products/software/pathwave-design-software/pathwave-em-design-software.html>, дата обращения 05.05.2023.
23. *Givi D. High-power electromagnetic radiators: nonlethal weapons and other applications*. Cambridge: Harvard University Press. 2004.
24. *Vaino C.E. Norms and eigenvector norms // Mathematics Notes*. 1979. V. 63. P. 1–42.

25. MIL-STD-461F. Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment. Interface Standard. 2007.

Информация об авторах

Роман Сергеевич Суворцев – к.т.н., доцент, кафедра телевидения и управления

SPIN-код: 6397-0900

Салим Карри – мл. науч. сотрудник, кафедра телевидения и управления

SPIN-код: 2617-1570

Иван Анатольевич Скворников – мл. науч. сотрудник, кафедра телевидения и управления

SPIN-код: не предоставлен

Статья поступила в редакцию 18.01.2024

Одобрена после рецензирования 15.02.2024

Принята к публикации 26.03.2024

ЖУРНАЛ «УСПЕХИ СОВРЕМЕННОЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Главный редактор: академик РАН Александр Степанович Бугаев

Международный научно-технический журнал, состоящий из научно-технических обзоров и статей по наиболее актуальным направлениям радиотехники и электроники.

Включен в Перечень ВАК

Издаётся с 1947 г.

ISSN 2070-0784

Периодичность – 12 номеров в год

«Пресса России» – индекс 83821



Научные специальности ВАК

- 1.2.1. Искусственный интеллект и машинное обучение
- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
- 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика
- 1.2.4. Кибербезопасность
- 2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника
- 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, являющиеся устройства
- 2.2.3. Технологии и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники
- 2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерений)
- 2.2.5. Приборы навигации
- 2.2.6. Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы
- 2.2.7. Фотоника
- 2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры
- 2.2.10. Метрология и метрологическое обеспечение
- 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы
- 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения
- 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии
- 2.2.16. Радиолокация и радионавигация
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации
- 2.3.2. Вычислительные системы и их элементы
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производством
- 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей
- 2.3.6. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность
- 2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования
- 2.3.8. Информатика и информационные процессы

Подписаться на журналы, выпускаемые Издательством «Радиотехника» (см. 4-ю сторону обложки), можно с любого месяца и на любой срок непосредственно в Издательстве.

Адрес Издательства:

107031, г. Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 20/6,
 тел./факс: (495) 625-78-72, 621-48-37, 625-92-41
<http://www.radiotec.ru>, e-mail: info@radiotec.ru

Investigating the influence of additional ground conductors influence on the characteristics of stripline devices with modal decomposition based on a meander line turn

R.S. Surovtsev¹, S. Karri², I.A. Skorniyakov³

¹⁻³ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Tomsk, Russia)

¹ surovtsevrs@gmail.com, ² karrisalim.h@gmail.com, ³ ivan_sk94@mail.ru

Abstract

Ensuring functional safety of radio-electronic equipment (REE) in conditions of electromagnetic interference (EMI) is relevant due to the decrease in the threshold of their susceptibility. This decrease results from an increase in the density of printed circuit board mounting, as well as the use of higher frequency signals. As a consequence, REE is becoming more susceptible to EMI, and traditional solutions cannot always provide efficient protection. Therefore, it is critical to search and investigate new protective solutions. One of such solutions is stripline devices with modal decomposition, e.g. based on only one turn of a meander line (ML). However, ML-based devices have large dimensions, even for relatively short interference durations. Therefore, it is relevant to find ways to improve them. One of ways is to fold the ML turn with a strong coupling between the signal conductors into a meander with a weak coupling between its half-turns. The approach is limited by the choice of the optimal distance between the meander half-turns, since their close proximity can deteriorate modal decomposition of EMI. We propose to place additional reference conductors between the half-turns. To evaluate the possibility of miniaturizing ML-based devices, the line was simulated and then validated experimentally. The aim of this paper is to present the results of a comprehensive study of the influence of additional ground conductors on the characteristics of stripline devices with modal decomposition based on the ML turn. The complex of results obtained allows us to state that the integration of additional conductors makes it possible to increase the length of the device on the given initial surface or to reduce the size of the device on the printed circuit board while maintaining the protective characteristics. The example of pulse interference shows an increase in attenuation by 1.3 times. The results of the study demonstrate the possibilities of reducing the size of stripline devices with modal decomposition on a given PCB area while preserving their EMI protection efficiency.

Keywords

Electromagnetic compatibility, radio electronic equipment, stripline devices, electromagnetic interference protection, ultra-wideband interference, signal integrity

For citation

Surovtsev R.S., Karri S., Skorniyakov I.A. Investigating the influence of additional ground conductors influence on the characteristics of stripline devices with modal decomposition based on a meander line turn. *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2024. V. 29. № 2. P. 30–43. DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202402-04> (in Russian)

References

1. Sitarov A.V., Bokova O.I., Khokhlov N.S. Electromagnetic terrorism as a source of threats to infocommunication communication and management systems. *Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*. 2014. № 13. P. 106–109. (in Russian)
2. Tihanyi L. EMC in power electronics. N.J.: IEEE Press. 1995. 415 p.
3. GOST R 51318.11–2006. Electromagnetic compatibility of technical means. Industrial, scientific, medical and household (PNMB) high-frequency devices. Industrial radio interference. Norms and measurement methods. M.: Standartinform. 2007. 39 p. (in Russian)
4. Sakharov K.Yu., Sokolov A.A., Mikhnev O.V., Turkin V.A., Kornev A.N., Dolbova S.N., Pevnev A.V. Investigation of the functioning of a local computer network under the influence of ultrashort electromagnetic pulses. *Technologies of electromagnetic compatibility*. 2006. № 3(18). P. 36–40. (in Russian)
5. Gizatullin Z.M. Noise immunity of computer equipment inside buildings under broadband electromagnetic influences. Kazan: KSTU Publishing House. 2012. 254 p. (in Russian)
6. Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2016. V. 61. № 5. P. 546–550. DOI 10.1134/S1064226916050053.
7. Mora N., Vega F., Lugin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources. *System and assessment notes*. 2014. № 41. P. 92.
8. Weber T., Krzikalla R., Ter Haseborg L. Linear and nonlinear filters suppressing UWB pulses. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2004. V. 46. № 3. P. 423–430. DOI 10.1109/TEMC.2004.831887.
9. Krzikalla R., Luiken J., Ter Haseborg L. Systematic description of the protection capability of protection elements. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Honolulu, USA. 2007. P. 1–5. DOI 10.1109/IEMC.2007.177.
10. Cui Q., Dong S., Han Y. Investigation of waffle structure SCR for electrostatic discharge (ESD) protection. *IEEE International Conference on Electron Devices and Solid State Circuit*. Bangkok, Thailand. 2012. P. 1–4. DOI 10.1109/EDSSC.2012.6482791.
11. Hayashi H., Kuroda T., Kato K., Fukuda K., Baba S., Fukuda Y. ESD Protection Design Optimization Using a Mixed-Mode Simulation and Its Impact on ESD Protection Design of Power Bus Line Resistance. *International Conference On Simulation of Semiconductor Processes and Devices*. Tokyo, Japan. 2005. P. 99–102. DOI 10.1109/SISPAD.2005.201482.
12. Surovtsev R.S., Novov A.V., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. Possibility of protection against UWB pulses based on a turn of a meander microstrip line. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2017. V. 59. № 6. P. 1864–1871. DOI 10.1109/TEMC.2017.2678019.

13. *Surovtsev R.S., Nosev A.V., Gazizov T.R.* Comparison of time responses of a meander line turn to ultrashort pulse excitation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2022. V. 64. № 4. P. 1265–1269. DOI 10.1109/TEMC.2022.3162640.
14. *Skornyakov I.A., Surovtsev R.S.* Analysis of the influence of the width of the decoupling route on the amplitude of cross-leads in a connected two-wire line. *Collection of selected articles of the international scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists "Scientific session TUSUR-2021"*. Tomsk, Russia. 2021. Part 2. P. 86–91. (in Russian)
15. *Surovtsev R.S., Skornyakov I.A., Karri S.* Miniaturization of a device based on a turn of a meander line using additional grounded conductors. *Reports of TUSUR*. 2022. V. 25. № 3. P. 14–20. (in Russian)
16. *Semenov E.V., Manichkin A.N., Malutin N.D.* Features of pulse sequences formed by phase filters based on C-sections with a periodic characteristic of the group delay time. *Radio engineering*. 2006. № 6. P. 27–30. (in Russian)
17. *Demakov A.V., Kozmabiyov M.E.* TEM cell for Testing Low-profile Integrated Circuits for EMC. *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*. 2020. P. 154–158. DOI 10.1109/EDM49804.2020.9153508.
18. IEC 62132-2 Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Immunity. Part 2. Measurement of Radiated Immunity, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method. First Edit. 2010.
19. PathWave Advanced Design System, [Electronic resource] – Access mode: <https://www.keysight.com/us/en/products/software/path-wave-design-software>, date of reference 05.04.2023.
20. *Segerlind L.* Application of the finite element method. M.: Mir. 1979. 392 p. (in Russian)
21. *Zenkovich O.* The finite element method in engineering. M.: Mir. 1975. 541 p. (in Russian)
22. PathWave EM Design. [Electronic resource] – Access mode: <https://www.keysight.com/us/en/products/software/pathwave-design-software/pathwave-em-design-software.html>, date of reference 05.05.2023.
23. *Giri D.* High-power electromagnetic radiators: nonlethal weapons and other applications. Cambridge: Harvard University Press. 2004.
24. *Baum C.E.* Norms and eigenvector norms. *Mathematics Notes*. 1979. V. 63. P. 1–42.
25. MIL-STD-461F. Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment. Interface Standard. 2007.

Information about the authors

Roman S. Surovtsev – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Television and Management

Salim Karri – Junior Research Scientist, Department of Television and Management

Ivan A. Skornyakov – Junior Research Scientist, Department of Television and Management

The article was submitted 18.01.2024

Approved after reviewing 15.02.2024

Accepted for publication 26.03.2024

ЖУРНАЛ «ДИНАМИКА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ – XXI ВЕК»

Главный редактор: докт. техн. наук, докт. экон. наук, профессор Павел Анатольевич Дроговоз

Международный научно-технический журнал, освещающий результаты научных исследований динамики процессов в сложных технических системах (радиотехника и электроника, физические системы, информатика и вычислительная техника, системы управления)



Включен в Перечень ВАК

Издаётся с 2011 г.

ISSN 1999-7493

Периодичность - 4 выпуска в год

«Пресса России» - индекс 71674

Научные специальности ВАК

- 1.2.1. Искусственный интеллект и машинное обучение
- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами
- 2.3.4. Управление в организационных системах
- 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей
- 2.3.6. Информатика и информационные процессы
- 5.2.2. Математические, статистические и инструментальные методы в экономике
- 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика

Полный перечень журналов и книг, выпускаемых Издательством «Радиотехника», размещен на сайте <http://www.radiotec.ru>

Подписаться на журналы, выпускаемые Издательством «Радиотехника» (см. 4-ю сторону обложки), можно с любого месяца и на любой срок непосредственно в Издательстве.

Адрес Издательства:

107031, г. Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 20/6,
 тел./факс: (495) 625-78-72, 621-48-37, 625-92-41
<http://www.radiotec.ru>, e-mail: info@radiotec.ru