

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

XIV Международная научно-практическая конференция

ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

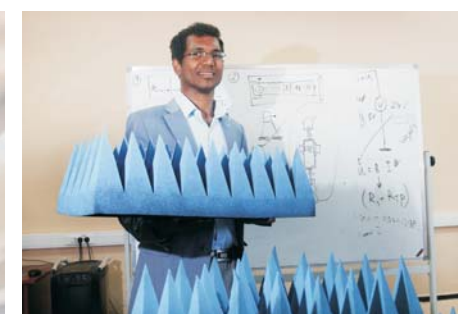
Материалы докладов

г. Томск

28–30 ноября 2018 г.

В двух частях

ЧАСТЬ 1



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

XIV Международная научно-практическая конференция

28–30 ноября 2018 г.

Материалы докладов

В двух частях

Часть 1

В-Спектр
Томск – 2018

УДК 621.37/39 + 681.3
ББК (Ж/О) 32.84.85.965
Э 45

Э 45 **Электронные средства и системы управления:** материалы докладов XIV Международной научно-практической конференции (28–30 ноября 2018 г.): в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2018. – 348 с.
ISBN 978-5-91191-401-1
ISBN 978-5-91191-402-8 (Ч. 1)
ISBN 978-5-91191-403-5 (Ч. 2)

Сборник содержит материалы докладов, представленных на XIV Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 28–30 ноября 2018 г.), по следующим направлениям: радиотехнические и телекоммуникационные системы; наноэлектроника СВЧ; нанотехнологии в электронике; антенны и микроволновые устройства СВЧ; нелинейная оптика; интеллектуальная силовая электроника и преобразовательная техника; плазменная электроника; биомедицинская электроника; автоматизация и оптимизация систем управления и обработка информации; интеллектуальные системы проектирования, автоматизация проектирования электронных устройств и систем; информационная безопасность; информационные технологии в управлении и принятии решений; информационные технологии в обучении; инновации в сфере электроники и управления; оптоэлектроника и фотоника; видеоинформационные технологии и цифровое телевидение.

Для студентов, преподавателей и специалистов, интересующихся проблемами систем управления.

УДК 621.37/39 + 681.3
ББК (Ж/О) 32.84.85.965

*Конференция проводится при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ).
Проект № 18-07-20094*

*Часть статей секций 2–22 направлена для публикации
в журнале «Доклады ТУСУРа»*

ISBN 978-5-91191-401-1
ISBN 978-5-91191-402-8 (Ч. 1)

© ТУСУР, 2018
© Коллектив авторов, 2018

СПОНСОР КОНФЕРЕНЦИИ – ООО «КЕЙСАЙТ ТЕКНОЛОДЖИЗ»

**KEYSIGHT
TECHNOLOGIES**ООО «Кейсайт Текнолоджиз»
Россия, 115054, г. Москва,
Космодамианская наб., 52, стр. 3.Тел.: 495 797 39 00
Факс: 495 797 39 02
www.keysight.ru

Keysight Technologies – мировой технологический лидер на рынке контрольно-измерительных решений для электронной, оборонной, аэрокосмической и телекоммуникационной промышленности.

Как самостоятельная компания Keysight Technologies была образована в 2014 г. в результате стратегического разделения компании Agilent Technologies, которая, в свою очередь, до 1999 г. входила в корпорацию Hewlett-Packard. Первый измерительный прибор под маркой Hewlett-Packard был выпущен более 75 лет назад.

В настоящий момент компания Keysight Technologies предоставляет самый широкий на рынке спектр лабораторных, модульных и портативных контрольно-измерительных приборов, в том числе оборудование для радиоизмерений (генераторы сигналов, анализаторы сигналов, анализаторы цепей), осциллографы и приборы общего назначения (мультиметры, источники питания, генераторы импульсов, системы сбора данных, логические анализаторы, ручные приборы), решения для тестирования телекоммуникаций, а также системы автоматизированного проектирования и моделирования электронных устройств.

В России приборы Keysight Technologies, ранее производимые под маркой Hewlett-Packard / Agilent, используются уже более 45 лет и по праву считаются наиболее точным и надежным контрольно-измерительным оборудованием на рынке.

Российский офис компании Keysight Technologies предлагает своим клиентам локальную техническую и сервисную поддержку, техническую документацию на русском языке. Для серий малогабаритных осциллографов, генераторов сигналов и анализаторов спектра разработаны русскоязычные интерфейсы пользователя. На большинство приборов есть сертификаты об утверждении типа средств измерений. На постоянной основе ведется работа по включению в Госреестр новых приборов Keysight Technologies.

Среди крупнейших заказчиков Keysight Technologies в России ведущие научно-исследовательские институты, конструкторские бюро, вузы, крупнейшие операторы связи.

В 2012 г. компания Keysight Technologies открыла два дополнительных региональных офиса в России – в Приволжском и Сибирском федеральных округах. В 2013 г. дополнительный офис открыт в Ростове-на-Дону, в 2014 г. – в Санкт-Петербурге.

Информация о компании Keysight Technologies доступна в сети Интернет по адресу: www.keysight.ru

*Генеральный директор ООО «Кейсайт Текнолоджиз»
Смирнова Галина Владимировна*

СПОНСОР КОНФЕРЕНЦИИ – ООО «ЛЕКРОЙ РУС»



ООО «ЛеКрой РУС»
119071, г. Москва, 2-й Донской
проезд, д. 10, стр. 4, 2-й этаж

Тел.: 495 777-5591
Факс: 495 640-3023
<https://prist.ru/>

Компания «ПриСТ» основана в 1994 г. Сегодня АО «ПриСТ» один из крупнейших российских поставщиков приборов для электроизмерений, радиоизмерений и измерений параметров окружающей среды (<https://prist.ru/>).

В компании работает более 80 высококвалифицированных сотрудников, открыты представительства в Санкт-Петербурге и Екатеринбурге, имеется дилерская сеть по всей территории России, дилеры в Белоруссии и Казахстане.

Основные виды деятельности:

- Поставки измерительного оборудования.
- Технические консультации по подбору средств измерения и вариантам замен приборов, снятых с производства или морально устаревших.
- Услуги по поверке и калибровке СИ.
- Услуги по техническому обслуживанию СИ, включая закрытую калибровку.
- Услуги автоматизации процессов поверки и калибровки.
- Испытания для целей утверждения типа СИ.
- Сервисная поддержка, гарантийное и послегарантийное обслуживание.
- Предоставление СИ в арендное пользование.

Компания «ПриСТ» является эксклюзивным поставщиком на территории России и СНГ продукции таких компаний, как APPA, Center, Good Will Instrument, SEW, Tabor Electronics, Teledyne LeCroy и Wayne Kerr Electronics. Дистрибьюторские и партнерские соглашения связывают компанию со всемирно известными производителями: Anritsu, Fluke, Keysight, National Instruments, Rohde&Schwarz, Pendulum, Spectracom, TDK-Lambda, Pico Technology.

С 2004 г. АО «ПриСТ» представляет на российском рынке компанию LeCroy (с 2012 г. Teledyne LeCroy) – одного из мировых лидеров в разработке и производстве цифровых осциллографов. Осциллографы высочайшего класса помогают инженерам-конструкторам и учёным осуществлять наблюдение, измерение и анализ сигналов в электронных цепях и трактах различных устройств. Компания «Teledyne LeCroy» является одним из технологических лидеров на рынке цифровых осциллографов. Это подтверждают ее достижения, например, в 2013 г. компания представила многоканальную систему с полосой пропускания 100 ГГц в режиме реального времени. В том же 2013 г. были представлены осциллографы высокого разрешения (HDO) с 12-битным АЦП и полосой пропускания 1 ГГц. Семейство осциллографов HDO существенно изменило представление о точности измерений, доступной цифровым осциллографам. 2018 год ознаменовался выходом новой серии осциллографов высокого разрешения WavePro HDR, которая обеспечивает теперь высокоточные измерения в полосе до 8 ГГц. Кроме цифровых осциллографов, компания «Teledyne LeCroy» выпускает анализаторы протоколов. Это широкий класс приборов для тестирования устройств передачи данных как на физическом, так и на логическом уровне. В этой области «Teledyne LeCroy» также занимает лидирующие позиции и предоставляет решения для всех современных протоколов передачи последовательных данных (<http://lecroy-rus.ru/>).



Заключение

Выполнена разработка аналитических выражений для быстрой оценки формы и амплитуды СКИ в витке меандровой линии задержки. Для этого рассмотрены две известные модели для анализа перекрестных наводок в связанных линиях передачи. Дополнительно выполнено моделирование формы сигнала в конце витка меандровой линии в системе TALGAT. В результате оценок, выполненных на основе аналитических выражений и моделирования, выявлено хорошее качественное совпадение результатов расчета: все три сигнала, полученные разными методами, совпадают между собой по форме. Также выявлено количественное несовпадение по амплитуде отрицательного импульса перекрестной наводки на выходе витка меандровой линии до 11,35%. Сделано предположение о причинах несовпадения результатов вычислений.

Разработка моделей выполнена в рамках государственного задания № 8.9562.2017/БЧ Минобрнауки России. Моделирование выполнено за счет гранта РФФИ №18-37-00339 в ТУСУРе.

Литература

1. Петкай О. Защита объектов топливно-энергетического комплекса от угроз электромагнитного воздействия / О. Петкай, А. Тарабцев, А. Дерябин и др. // Безопасность объектов топливно-энергетического комплекса. – 2014. – № 2 (6). – С. 74–76.
2. Surovtsev R.S. Possibility of Protection Against UWB Pulses Based on a Turn of a Meander Microstrip Line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky // IEEE Transac-

tions on Electromagnetic Compatibility. – 2017. – Vol. 58, No. 6. – P. 1864–1871.

3. Сердюк Е.А. Обзор методов и подходов к моделированию меандровых линий задержки / Е.А. Сердюк, А.В. Носов // Научная сессия ТУСУР–2018: матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2018. – Т. 2. – С. 144–147.

4. Park S. Analytical Approach for Crosstalk Characterization of Multiconductor Transmission Lines Using Mode Decomposition Technique in the Time Domain / S. Park, F. Xiao, Y. Kami // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2010. – Vol. 52, No. 2. – P. 436–446.

5. You H. Crosstalk analysis of interconnection lines and Packages in High-speed integrated circuits / H. You, M. Soma // IEEE Transactions On Circuits And Systems. – 1990. – Vol. 37. – P. 1019–1026.

6. Суровцев Р.С. Распространение импульса в меандровой линии с неоднородным диэлектрическим заполнением без искажений его формы перекрестными наводками / Р.С. Суровцев, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов // Доклады ТУСУР. – 2014. – № 4(34). – С. 36–40.

7. Куксенко С.П. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 2(36). – С. 45–50.

Сердюк Екатерина Анатольевна

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа
Эл. почта: serduk.10@mail.ru

Суровцев Роман Сергеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа
Эл. почта: surovvtsevrts@gmail.com

УДК 621.3.091.1

А.В. Демаков, М.А. Зуева

Обзор экранирующих материалов

Выполнен обзор современных материалов и структур на их основе, применяемых при экранировании электромагнитных полей (ЭМП). Описаны механизмы, обеспечивающие экранирование ЭМП материалами. Приведены особенности экранирующих диэлектрических структур и композитных материалов, различающихся механизмом поглощения энергии ЭМП и химическим составом.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, экранирование, электромагнитные воздействия, композитные материалы.

Тенденции миниатюризации радиоэлектронных средств и освоение новых частотных диапазонов приводят к обострению проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС). Для защиты блоков и узлов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) от внешних и внутренних электромагнитных воздействий применяется электромагнитное экранирование [1]. В качестве материала при разработке экранов применяются металлы и их сплавы, которые постепенно заменяются на полимерные композиты, позволяющие уменьшить массу и повысить помехозащищенность РЭА, что является критичным для авиационной и

бортовой РЭА космических аппаратов [2]. На текущий момент разрабатываются экранирующие конструкции на основе проводящих и диэлектрических материалов, а также композитных полимерных материалов, позволяющих в широком диапазоне частот (до 100 ГГц) рассеивать электромагнитные волны (ЭМВ) и обладающих дополнительными свойствами для определенных условий эксплуатации (негорючесть, гидрофобность) [3]. Цель данной работы – представить обзор современных материалов и структур на их основе, применяемых при экранировании электромагнитных полей.

Свойства композитных экранирующих материалов

Количественной мерой экранирования материала является эффективность экранирования (ЭЭ), выражаемая в децибелах и являющаяся мерой радиопрозрачности материала для падающей ЭМВ в рабочем диапазоне частот. ЭЭ определяется через количественную меру затухания ЭМВ, распространяющейся через плоский экран из исследуемого материала:

$$\text{ЭЭ} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_i}{P_o} \right), \quad (1)$$

где P_i – мощность падающей на экран ЭМВ, P_o – мощность ЭМВ, прошедшей через экран.

Радиопоглощающие материалы (РПМ) характеризуются структурной неоднородностью, диэлектрическими и магнитными потерями, что приводит к рассеянию энергии ЭМВ при ее распространении через РПМ. При поглощении энергии ЭМВ рассеивается в виде тепловой энергии, увеличивая температурный градиент РПМ [4]. Также потери обуславливаются отражениями от поверхности материала (рис. 1).

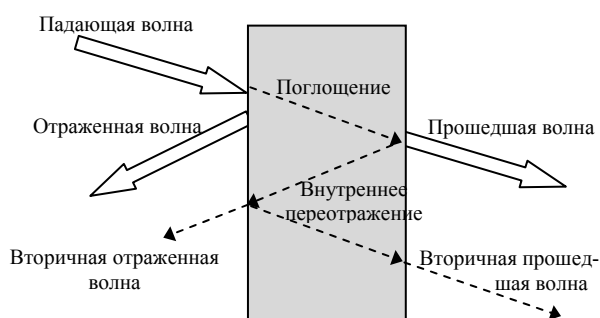


Рис. 1. Распространение ЭМВ через экранирующий материал

Для монолитных изотропных материалов оценка коэффициента поглощения A может быть выполнена на основе измерений коэффициента пропускания T и коэффициента отражения R :

$$A = 1 - R - T. \quad (2)$$

Для большинства экранирующих материалов (особенно для композитных и пористых) поглощающие свойства обеспечиваются за счет затухания от переотражений ЭМВ внутри материала. Для материалов с высокой проводимостью преобладает механизм потерь за счет отражений.

Если импеданс среды распространения ЭМВ не равен импедансу экранирующего материала, то происходит частичное отражение волны от поверхности экрана. При проникновении ЭМВ внутрь экрана происходит ее полное или частичное поглощение. Согласно [5] потерями на многократное отражение можно пренебречь, если их уровень составляет менее 10 дБ.

Диэлектрические экранирующие материалы

Интерференционные РПМ состоят из чередующихся диэлектрических и проводящих слоев, в ко-

торых происходит фазовый сдвиг ЭМВ при отражении от электропроводящих слоёв, что приводит к компенсации падающих и отраженных ЭМВ. При этом данные материалы характеризуются достаточно узким рабочим диапазоном частот [6].

Градиентные РПМ диэлектрического типа имеют многослойную структуру с плавным изменением диэлектрической проницаемости по глубине материала [7]. Под действием внешнего ЭМП в функциональных частицах диэлектрического типа протекает электрический ток, который затухает за счет собственного сопротивления частиц, а также переориентации возбужденных частиц наполнителя (диполей) по отношению к направлению вектора напряженности ЭМП, что приводит к переходу его энергии в тепловую.

Преимуществом градиентных материалов по сравнению с многослойными структурами является отсутствие отражений на границах между слоями. Внешний (входной или согласующий) слой изготавливают из диэлектрического материала с большим содержанием воздушных пор (например, пенопласт) с диэлектрической проницаемостью, близкой к единице. Остальные поглощающие слои изготавливают из диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью с поглощающим проводящим наполнителем диэлектрического типа. Ранее в качестве таких наполнителей использовалась электропроводящая сажа, однако на данный момент широко используется наполнитель из углеродных волокон, посредством которых добиваются требуемых электрических характеристик материала [8].

Также к градиентным РПМ относят материалы с рельефной внешней поверхностью, образуемой выступами в виде конусов или пирамид. Такая форма РПМ обеспечивает многократное переотражение ЭМВ, что приводит к поглощению энергии ЭМВ и уменьшению коэффициента отражения [9].

Композитные экранирующие материалы

Для изменения электрических и механических характеристик полимеров прибегают к их армированию наполнителями, что приводит к созданию композитного материала со свойствами, отличающимися от свойств каждого из его составляющих. Большинство современных полимеров являются изоляторами, но также синтезируются полимеры, характеризующиеся высоким значением проводимости (например, полианилин, полипиррол и др.), что позволяет использовать их для создания композитных экранирующих материалов.

Широкое применение получили композитные материалы магнитного типа, в которых в качестве наполнителя используются ферромагнитные и ферритовые порошки разных составов и морфологии на основе железа, никеля и кобальта. При взаимодействии ЭМВ с наполнителем магнитного типа происходит переориентация магнитных областей (доменов) в зависимости от вектора напряженности магнитного поля. Наряду с этим для магнитного наполнителя характерен другой вид потерь, связанный с появле-

нием затухающих вихревых токов при действии на частицы внешнего магнитного поля. Такие материалы по сравнению с материалами диэлектрического типа обладают меньшей толщиной, что позволяет применять их в качестве покрытий. Для изготовления данного типа экранирующих материалов распространение получили барьерные гексагональные ферриты. В данных композитах затухание ЭМВ обеспечивается за счет естественного ферромагнитного резонанса, частота которого может регулироваться путем легирования ферритов металлами [10].

Для получения экранов с малыми значениями плотности материала (порядка 900–1000 кг/м³) прибегают к синтезу пористых композитных материалов. Синтактовые пористые материалы представляют собой легкие композитные материалы с полыми частицами, диспергированными в матрице [11]. Известно, что увеличение электропроводности материала приводит к увеличению его ЭЭ, что на практике может быть реализовано путем добавления в композит полых проводящих частиц либо путем добавления дополнительного наполнителя с высоким значением проводимости. Синтез полых проводящих частиц может быть выполнен посредством химического синтеза микросфер с проводящим покрытием и последующим удалением внутренней органической матрицы, либо путем нанесения проводящего покрытия осаждением из паров [12]. Использование дополнительного проводящего наполнителя рассмотрено в работе [13] на примере синтактового материала на основе фенольной смолы с добавлением углеродного нановолокна. Показано, что с ростом весового содержания углеродного нановолокна от массы материала ЭЭ увеличивается, а потери на отражения ЭМВ становятся определяющим механизмом экранирования.

Вспененные материалы также представляют интерес при экранировании электромагнитных помех. Для снижения вязкости полимеров применяется порофор, который предотвращает агрегацию волокон и увеличивает дисперсию наполнителя, что позволяет снизить порог электрической перколяции и упростить обработку материала [14]. Также разрабатываются углеродные пенополимерные композиты, армированные металлами. Так, в работе [15] продемонстрирован принцип синтеза углеродного пенополимера с наночастицами никеля размером 50–100 нм, что обеспечивает ЭЭ = 45 дБ на частоте 13,3 ГГц при толщине экрана 2 мм. Также разрабатываются композиты на основе углеродного пенополимера, армированного нановолокнами карбида кремния с объемной долей нановолокон 20% от общего объема материала. ЭЭ полученного материала составила 46 дБ на частоте 8,2 ГГц [16].

Экранирование ЭМП в широком диапазоне частот обеспечивают экраны, представляющие собой комбинацию поглотителей различных типов [8]. Так, в работе [17] исследован многослойный композитный экранирующий материал с примесью аморфных магнитных микропроводов со стеклянным покрытием,

каждый слой которого позволяет избирательно экранировать энергию ЭМВ в определенном диапазоне частот. Регулировка диапазона поглощения производится путем изменения длин микропроводов. Результаты измерений ЭЭ в диапазоне частот от 0,8 до 1,5 ГГц из двух слоев составила 4–9,5 дБ, из 14 слоев – 18–33 дБ и из 28 слоев – 36–48 дБ.

За счет поглощения энергии ЭМВ температура экрана увеличивается, в связи с чем необходимо учитывать влияние температуры на характеристики композитных экранов. Результаты исследования влияния температуры на экранирующие свойства графеносодержащего термопластичного полиуретанового композита представлены в [18]. Показано, что в диапазоне частот 25 кГц – 5 МГц значения проводимости и диэлектрической проницаемости остаются неизменными в интервале температур 308–383 К, но при нагреве до 423 К ЭЭ увеличивается на 10 дБ за счет роста проводимости и увеличения потерь на отражение ЭМВ. При этом мало исследованы температурные зависимости характеристик экранирующих композитов в диапазоне высоких и сверхвысоких частот, что является предметом будущих исследований.

Заключение

В данной работе приведен обзор современных композитных материалов, используемых в составе экранирующих конструкций РЭА. Приведено описание различных экранирующих материалов по их составу и механизму поглощения энергии ЭМП.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00619.

Литература

1. Князев А.Д. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости / А.Д. Князев, Л.Н. Кечиев, Б.В. Петров. – М.: Радио и связь, 1989. – 224 с.
2. Комнатнов М.Е. Моделирование эффективности экранирования металлической пластиной для бортовой аппаратуры космического аппарата / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов, А.С. Дементьев // Доклады ТУСУР. – 2011. – №2(24), ч. 1. – С. 133–136.
3. Банный В.А. Применение полимерных радиопоглощающих материалов в решении проблемы электромагнитной безопасности / В.А. Банный, В.А. Игнатенко // Проблемы здоровья и экологии. – 2016. – № 3. – С. 9–13.
4. Clark D.E. Processing materials with microwave energy / D.E. Clark, D.C. Folz, J.K. West // Materials Science and Engineering: A. – 2000. – Vol. 287, № 2. – P. 153–158.
5. Gonschorek K.-H. Electromagnetic Compatibility for Device Design and System Integration / K.-H. Gonschorek, R. Vick. – Berlin: Springer, 2009. – 467 p.
6. Grimes C.A. A brief discussion of EMI shielding materials / C.A. Grimes, D.M. Grimes // Proc. IEEE Aero-space Applications Conference Digest. – 1993. – P. 217–226.
7. Gaoui B. Enhancement of the shielding effectiveness of multilayer materials by gradient thickness in the stacked layers / B. Gaoui, A. Hadjadj, M. Kiouss // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2017. – Vol. 28, № 15. – P. 11292–11299.
8. Латыпова А.Ф. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов / А.Ф. Латыпова, Ю.Е. Калинин //

Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 8, №6. – С. 70–76.

9. Aoyagi T. Effects of incident directions on reflection coefficients of pyramidal electromagnetic wave absorber / T. Aoyagi, H. Kurihara, K. Takizawa, Y. Hirai // Proc. Int. Symp. Electromagn. Compat. (EMC). – 2014. – P. 278–281.

10. Li B.-W. Enhanced microwave absorption in nickel/hexagonal-ferrite/polymer composites / B.-W. Li, Y. Shen, Z.-X. Yue, C.-W. Nan // Applied Physics Letters. – 2006. – Vol. 89, №13.

11. Gupta N. Reinforced polymer matrix syntactic foams: effect of nano and micro-scale reinforcement / N. Gupta, D. Pinisetty, V.C. Shunmugasamy. – Berlin: Springer, 2013. – 80 p.

12. Xie X. Synthesis and characterization of multilayer core-shell structure hollow spheres with low density, favorable magnetic and conductive properties / X. Xie, Y. Wu, Y. Kong, Z. Zhang, X. Zhou // Colloids and surfaces. – 2012. – Vol. 408. – P. 104–113.

13. Zhang L. Effect of carbon nanofiber reinforcement on electromagnetic interference shielding effectiveness of syntactic foam / L. Zhang, L.B. Wang, K.Y. See, J. Ma // Journal of Material Science. – 2013. – Vol. 48, № 21. – P. 7757–7763.

14. Pegel S. Dispersion, agglomeration, and network formation of multiwalled carbon nano-tubes in polycarbonate melts / S. Pegel, P. Potschke, G. Petzold et al. // Polymer. – 2008. – Vol. 49, № 4. – P. 974–984.

15. Zhao H.-B. Excellent electromagnetic absorption capability of Ni/Carbon based conductive and magnetic foams synthesized via a green one pot route / H.-B. Zhao, Z.-B. Fu, H.B. Chen et al. // ACS Applied Materials and Interfaces. – 2016. – Vol. 8, № 2. – P. 1468–1477.

16. Farhan S. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon foam containing in situ grown silicon carbide nanowires / S. Farhan, R. Wang, K. Li // Ceramics International. – 2016. – Vol. 42, № 9. – P. 11330–11340.

17. Ababei G. Omni-directional selective shielding multilayered material for high frequency radiation / G. Ababei, V. David, V. Dafinescu et al. // IEEE Trans. on Magnetics. – 2012. – Vol. 48, № 11. – P. 4309–4312.

18. Jan R. Estimating EMI shielding effectiveness of graphene-polymer composites at elevated temperatures / R. Jan, A. Saboor, A.N. Khan, I. Ahmad // Material Research Express. – 2017. – Vol. 4, № 8. – P. 1–8.

Демаков Александр Витальевич

Инж. каф. ТУ ТУСУРа

Эл. почта: vandervals@inbox.ru

Зуева Мария Александровна

Инж. НИЛ «БЭМС РЭС» ТУСУРа

Эл. почта: zueva_ria@mail.ru

УДК 621.396.41

Ш.В. Куулар, Р.Р. Хажибеков, Е.Б. Черникова

Моделирование модального фильтра для защиты входных цепей пикосекундного локатора

Предложено использование модальной фильтрации для защиты входных цепей пикосекундного локатора. Выполнена параметрическая оптимизация трех структур модальных фильтров (МФ) генетическими алгоритмами. Представлены структуры МФ с прямоугольным вырезом, обладающие увеличенным значением коэффициента передачи в полосе пропускания.

Ключевые слова: модальный фильтр, пикосекундный локатор, оптимизация, коэффициент передачи, резонансная частота.

В современной радиолокации одной из актуальных проблем является борьба с пассивными помехами, связанными с отражениями. Они могут привести к подавлению полезных сигналов и насыщению приемного тракта локатора. В настоящее время для защиты локаторов широко используется схема на основе диодов [1]. Недостаток ее в том, что с повышением уровня входного сигнала данная схема защиты входит в режим ограничения и информация о объектах вблизи теряется. Предлагаются устройства защиты на основе модальной фильтрации, которые не обладают этим недостатком [2]. Кроме того, модальные фильтры (МФ) обеспечивают защиту в пикосекундном диапазоне работы локатора.

Для нормального функционирования в системах радиолокации МФ должен соответствовать следующим требованиям: иметь волновое сопротивление

50 Ом, плоскую характеристику в полосе пропускания, чтобы снизить влияние на полезный сигнал, и значение резонансной частоты должно быть небольшим для приемлемой разности задержек мод. Таким образом, целью данной работы является исследование структур МФ для защиты входных цепей пикосекундного локатора.

Квазистатическое моделирование

Исследовались поперечные сечения структур МФ (рис. 1, а–в), которые могут быть пригодны для защиты в пикосекундном диапазоне [3]. Однако для нормального функционирования, МФ в системах радиолокации должен соответствовать следующим требованиям: иметь волновое сопротивление 50 Ом для согласования входных цепей локаторов и МФ, плоскую характеристику в полосе пропускания, чтобы снизить влияние МФ на полезный сигнал ПЛ,