

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 537.86/87,681.32

ПОБОЧНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ
ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ В РЕЖИМЕ ИМПУЛЬСНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ
КОННЕКТОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕЧАТНОЙ ТОПОЛОГИИ

© 2019 г. М. С. Костин^{1,*}, В. М. Викулов¹, А. А. Парамонов¹

¹МИРЭА – Российский технологический университет,
Российская Федерация, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78

*E-mail: mihailkos@mail.ru

Поступила в редакцию 12.04.2018 г.

После доработки 01.06.2018 г.

Принята к публикации 11.06.2018 г.

Рассмотрены особенности образования полей побочных электромагнитных излучений, возникающих за счет импульсного возбуждения элементов печатной топологии. Такое образование полей оказывает влияние на электромагнитную совместимость цифровых устройств обработки сигналов. Показано, что печатные проводники в платах со сложной топологией при определенной геометрической конфигурации способны выполнять функции электромагнитных излучателей. Установлено, что длительность видеоимпульса, тактовая частота и фаза чередования кодовой последовательности определяют спектральный характер цифрового сигнала, который может совпадать с собственными частотами печатных излучателей, в том числе образуя режим возбуждения на собственных колебаниях в случае с уменьшением длительности или крутизны фронтов видеоимпульсов. Представлены результаты практических исследований прототипов потенциально излучающих элементов печатной конфигурации.

DOI: 10.1134/S0033849419020116

ВВЕДЕНИЕ

Одним из факторов нарушения электромагнитной совместимости быстродействующих цифровых устройств наносекундного диапазона являются побочные электромагнитные излучения и наводки (ПЭМИН), обусловленные спонтанным распространением электромагнитных полей от циркулируемых в открытых коннекторных печатных линиях видеоимпульсных сигналов в границах ближней зоны Френеля, а также за пределами печатного модуля в дальней зоне Фраунгофера. Под электромагнитной совместимостью будем понимать способность цифровых устройств, расположенных в составе единого аппаратного средства одновременно и безошибочно функционировать в реальных условиях эксплуатации при воздействии на них непреднамеренных ПЭМИН, не создавая электромагнитных помех другим цифровым устройствам.

Цель работы – исследовать образование ПЭМИН цифровых систем, в конструкции которых присутствуют элементы с наиболее вероятной печатной конфигурацией.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОТОТИПОВ
ИЗЛУЧАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ
ПЕЧАТНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Наиболее вероятным конструктивным элементом печатных модулей, образующих ПЭМИН, при высокоскоростной обработке цифровых сигналов,

является топологический рисунок токопроводящих слоев печатной платы (ПП), выполняющих функционально схемотехническую задачу коммутации цифровых микросхем, микроконтроллеров, процессоров и программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Это обусловлено тем, что печатные контактные проводники и печатные полигоны при определенных геометрических соотношениях форм топологии способны выполнять роль пассивных излучающих антенн, часто встречающихся в составе сложной печатной топологии ввиду спектральных особенностей видеоимпульсных сигналов, в том числе из-за их импульсно-кодовой комбинации. Иными словами, в случае обработки цифровых сигналов, образуемых бинарным кодом из чередования видеоимпульсной последовательности, радиотехническим параметром определяющим вероятность образования ПЭМИН является длительность базисного видеоимпульса, частота тактовых сигналов и спектральные комбинации импульсных последовательностей. При этом длительность видеоимпульса и фаза их чередования в определенный момент времени будут определять спектр импульсной последовательности, который может совпадать с собственными частотами случайных печатных излучателей различной конфигурации. Кроме того, с уменьшением длительности или фронта (среза) видеоимпульса существенно возрастает эффективность образования активного ПЭМИН элем-

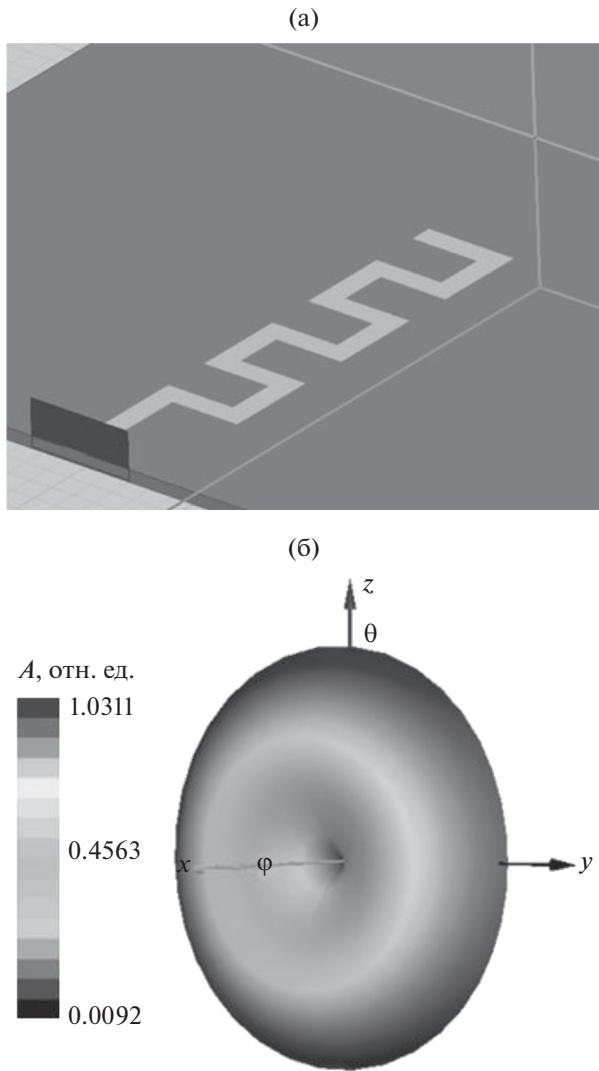


Рис. 1. Общий вид (а) и ДН (б) полосковой меандровой антенны.

ментами печатной топологии в режиме собственных колебаний, обусловленными или реакцией потенциального печатного излучателя на наносекундное короткоимпульсное воздействие, или переходными процессами.

Как известно, характер образования каналов ПЭМИН зависит от следующих параметров: мощности цифрового сигнала, частотно-полосовых характеристик сигнала и элементов печатных проводников, составляющих потенциальный излучатель, и радиофизических свойств среды распространения.

Для программно-численного моделирования радиофизических процессов ПЭМИН были рассмотрены три наиболее часто встречающиеся топологические структуры печатных проводников: меандровая, петлевая и штыревая антенны. Такие структуры сопоставимы с прототипами типовых микрополосковых антенн и способны выполнять функции потенциальных излучателей.

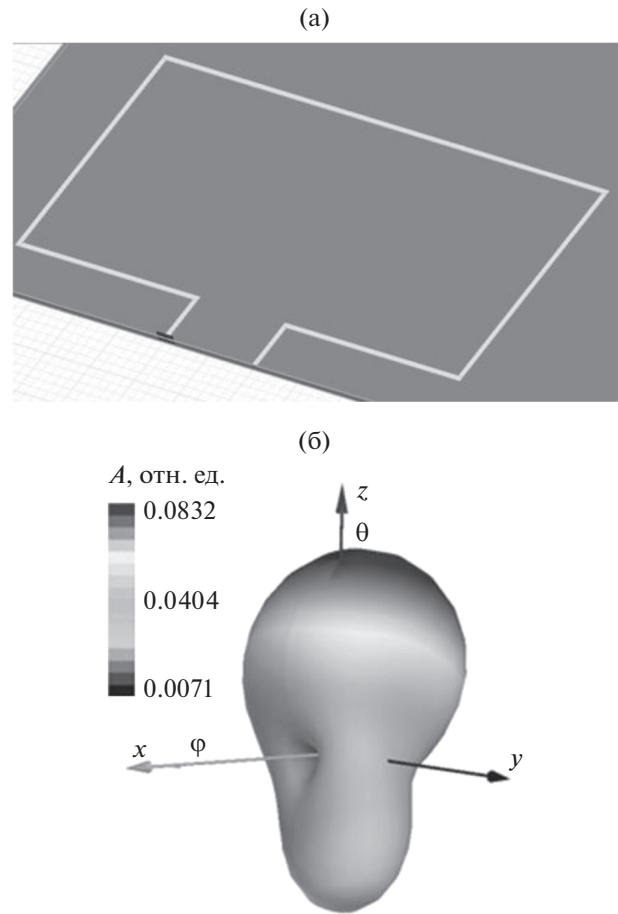


Рис. 2. Общий вид (а) и ДН (б) полосковой петлевой антенны.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЛУЧАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕЧАТНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Для оценки влияния ПЭМИН были исследованы следующие виды полосковых антенн, образование которых носит наиболее вероятный статистический характер для многослойных ПП со сложной конфигурацией печатного рисунка.

Меандровая антenna. Так называемые “змейвидные” проводники часто используются в топологии ПП для уравнивания электрической длины, поскольку зачастую они образуют подобие меандровых антенн. На рис. 1а, 1б приведен вид такой антенны и ее диаграмма направленности (ДН), построенная в среде программного моделирования HFSS Ansoft [1].

Петлевая антenna. Нередко по периметру пластины при трассировке разводится заземляющий общий провод, который в общем случае может представлять собой петлевую antennу. На рис. 2а, 2б представлен примерный вид петлевой антенны и ее ДН.

Штыревая антenna. Любой отрезок проводника на ПП может быть потенциальным излучате-

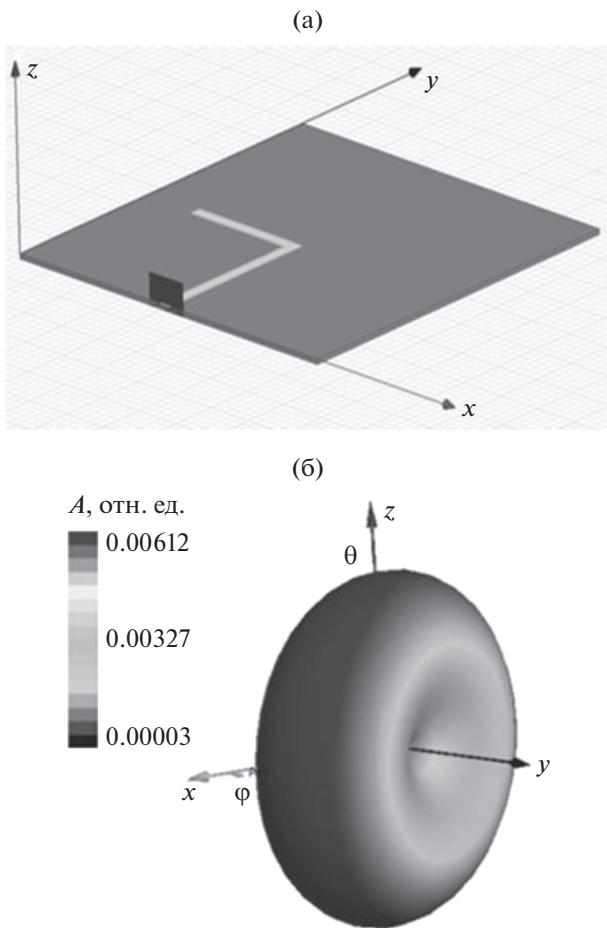


Рис. 3. Общий вид (а) и ДН (б) полосковой штыревой антенны.

лем, если его физическая длина будет кратна четверти длины волны проходящего по нему сигнала. При этом сам отрезок не обязательно должен быть полностью прямым. Г-образная форма внесет не существенные изменения. На рис. 3а, 3б приведен примерный вид подобного излучателя и его ДН.

3. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛОВ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ И ЭЛЕМЕНТОВ ПЕЧАТНОЙ ТОПОЛОГИИ

Для оценки мощности побочных излучений рассмотрим спектральные характеристики сигнальных процессов и амплитудно-частотные характеристики антенн-проводников.

Основным носителем информации в сигнальных шинах ПП являются видеоимпульсы [2]. При этом, как следует из теории антенн [3, 4], большая часть эффективного спектра цифровых сигналов окажется за пределами нижней границы полосы пропускания потенциальных излучателей в составе топологии ПП. Однако в современных высокоскоростных интерфейсах частоты достигают сотен мегагерц, на которых выходные каскады, формирующие импульсы, не успевают отрабатывать фронты и спады и получившийся на выходе импульс существенно отличается от прямоугольного (рис. 4).

Таким образом, спектр реального импульса в цепи ПП существенно отличается от теоретиче-

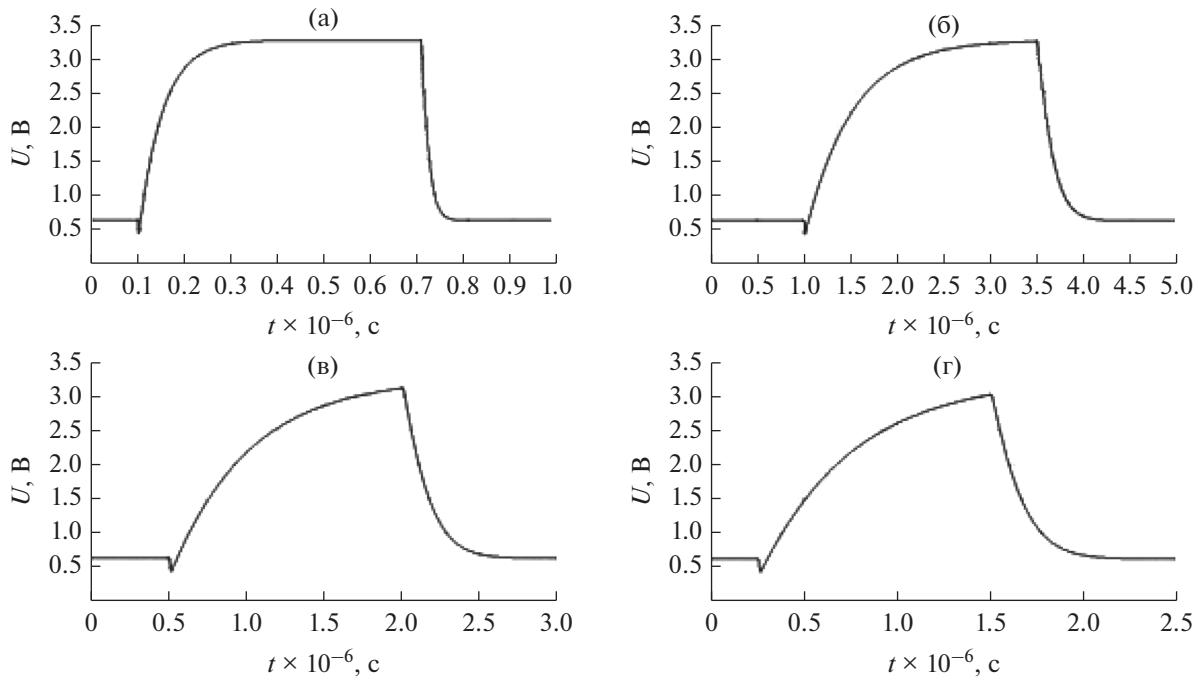


Рис. 4. Временные характеристики ВЧ-видеоимпульсов: 100 (а), 200 (б), 333 (в) и 400 МГц (г).

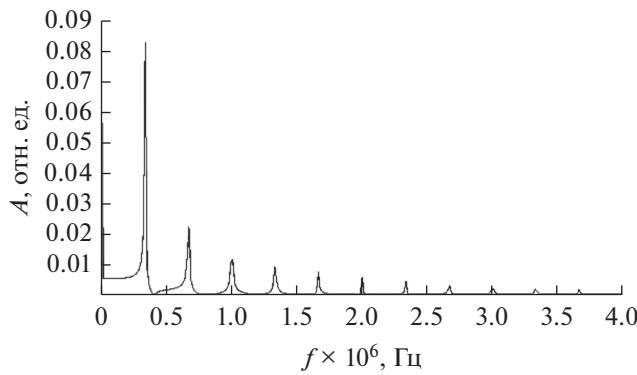


Рис. 5. Спектр последовательности видеоимпульсов с частотой 333 МГц.

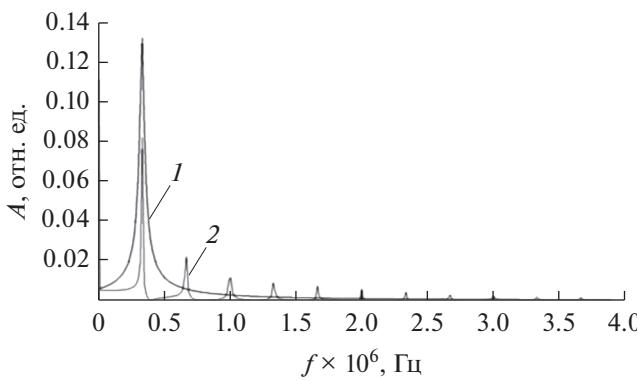


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика петлевой антенны (кривая 1) и спектр излучаемых видеоимпульсов на частоте 333 МГц (кривая 2).

ского. С ростом частоты все большая часть спектральной плотности сигнала собирается в области высоких частот, что увеличивает мощность побочных излучений. На рис. 5 приведен спектр последовательности реальных импульсов с частотой 333 МГц. При этом отдельные ограничения накладывает АЧХ антенн-проводников. В условиях ПП полученные антенны будут иметь крайне узкую полосу пропускания.

На рис. 6 представлен спектр ранее рассмотренного видеоимпульса и АЧХ петлевой антенны. Как видно, существенная часть мощности сигнала способна излучаться в эфир, нарушая условия электромагнитной совместимости. При

программно-численном моделировании было получено, что порядка 25% мощности исходного сигнала антenna излучает в свободное пространство.

Если взять интерфейсы на базе TTL-логики, то при высоком уровне напряжения $U = 3.3$ В и токе $I = 100$ мА мощность выходного импульса способна достигать в пределе 330 мВт. Таким образом, пропуская 25% мощности, антenna-проводник может излучить порядка 80 мВт, что в условиях ближней зоны способно однозначно нарушить целостность работы цифровой системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, побочные электромагнитные излучения проводников сигнальных и токоведущих шин ПП, по которым протекают видеоимпульсы, может существенно сказываться на работе других устройств в составе единого модуля, субблока, блока или даже целого аппаратного комплекса.

При разводке ПП можно получить случайным, однако наиболее вероятным образом антенные структуры, которые из конфигурации топологического рисунка ПП образуют потенциальные излучатели, способные ухудшить показатели электромагнитной совместимости цифровых устройств. Отсюда одним из радиотехнических решений компенсации ПЭМИН является применение специализированных экранов и переход к радиофотонной модификации сигнальных шин данных [5] в составе ПП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Банков С.Е., Курушин А.А. // HFSS Ansoft. Электродинамическое моделирование сложных СВЧ структур. М.: Солон-Пресс, 2006.
- Склар Б. // Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: ИД “Вильямс”, 2003.
- Milligan T.A. // Modern Antenna Design. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.
- Garg R., Bhartia P., Bahl I., Ittipiboon A. Microstrip Antenna Design Handbook. Norwood: Artech House, Inc, 2000.
- Белкин М.Е., Кудж С.А., Сигов А.С. // Рес. технол. журн. 2016. № 1. Т. 4. С. 4. <https://www.mirea.ru/upload/medialibrary/64f/2.pdf>.