

Особенности метода проектирования печатной интегральной антенны на примере прямохаотического приёмопередатчика диапазона 3-5 ГГц

А.В. Уваров^{1,2}, А.В. Уваров²

¹Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия, anton.uvarov@phystech.edu

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)», Москва, Россия

В работе изложены особенности метода проектирования печатной интегральной монополярной антенны. Методология проектирования печатных интегральных антенн, выполненных на одной подложке и в одном технологическом процессе вместе с СВЧ приемопередатчиком апробирована на антенне для СШП прямохаотического беспроводного приемопередающего модуля диапазона 3-5 ГГц. Результаты численного электродинамического моделирования антенны были подтверждены экспериментальными измерениями опытных образцов.

The paper describes special aspects of printed integrated monopole antenna designing technique. A comprehensive technique were applied and approved for designing of antenna for UWB direct chaotic wireless transceiver module for the 3-5 GHz band in order to take account of the effects of two-way influence of the antenna and the transceiver circuits. The results of numerical modeling of antenna have been confirmed by experimental measurements of the prototype.

Введение

Печатные антенны, выполненные на одной подложке и в одном технологическом процессе вместе с СВЧ приемопередающими цепями широко распространены. Популярность таких антенн объясняется их невысокой стоимостью, воспроизводимостью характеристик, более высокой надежностью в связи единым стеклом печатной платы и с отсутствием мест пайки, разъемных соединений, и тенденцией к уменьшению габаритных размеров беспроводных устройств связи. Хорошим способом миниатюризации является совместное использование выделенной площади печатной платы антенной и приемопередающими аналоговыми и цифровыми цепями. Сложность разработки подобных антенн связана с учетом эффектов взаимодействия (электромагнитной совместимости) цепей приемопередающей схемы, управления и питания с антенной структурой. Это проявляется как на этапе проектирования антенны, так и на этапе экспериментальной верификации характеристик антенны.

В качестве антенны для СШП прямохаотического беспроводного приемопередающего модуля была выбрана печатная монополярная антенна, которая фактически является несимметричным печатным диполем [1], на одном из плечей которого расположены цепи приемопередающего модуля. Для учета эффектов взаимного влияния антенны и цепей приемопередатчика была применена методология проектирования интегральных печатных антенн [2], выполненных на одной подложке и в одном технологическом процесса вместе с СВЧ приемопередатчиком.

Экспериментальная верификация рассчитанных характеристик антенны была затруднена в связи с интегральным исполнением самой антенны, которая фактически не имеет порта, разъемного соединения между антенно-фидерной системой и приемопередатчиком, причем цепи приемопередатчика являются неотъемлемой частью антенной структуры, так как расположены непосредственно на одном плече несимметричного диполя. Для измерения характеристик было использовано три

различных способа. В работе приведен сравнительный анализ предложенных способов измерения характеристик. Полученные результаты численного электродинамического моделирования антенны были подтверждены экспериментальными измерениями опытных образцов.

1. Преимущества печатных антенн

Благодаря своим свойствам печатные антенны обладают хорошей воспроизводимостью и повторяемостью характеристик, а также обеспечивают более высокую надежность работы устройства. Причина – производство антенны в едином стекле печатной платы, отсутствие ненадежных хрупких узлов соединения, мест пайки разъемов как у внешних объемных антенн, которые, часто могут требовать защиты от электростатического разряда, а также дополнительных шагов при производстве и монтаже. Более того, в процессе эксплуатации печатные антенны более надежны, так как не содержат разъемных соединений и устойчивы к термоциклированию, в отличие, например, от керамической чип-антенны, для которой трудно подобрать коэффициент теплового расширения, соответствующий материалу подложки печатной платы.

Интеграция антенны на одной подложке с приемопередающим модулем в рамках одного технологического процесса позволяет разработчику не использовать для установки антенны разъемов и дополнительных настроечных соединительных схем, отказаться от процесса монтажа антенны в устройство, что в свою очередь снижает как себестоимость печатной платы без разъемов, так и стоимость сборки конечного устройства с антенной.

Важно также понимать ряд потенциальных ограничений печатных антенн. Во-первых, ограничение по материалу подложки. Часто применяемый стеклотекстолит FR-4 обладает высокими потерями и анизотропностью свойств по сравнению с СВЧ-материалами марок Rogers. Во-вторых, ограничение на производственный процесс. Изготовление печатной платы должно быть оптимизировано для массового производства, а значит важно, чтобы топология печатной антенны была устойчива к небольшим погрешностям в технологическом процессе и не требовало его изменений. В-третьих, так как стоимость печатной платы приёмопередатчика с печатной антенной в основном определяется её площадью, то возникает ограничение на габаритные размеры платы устройства и, следовательно, ограничение на топологию печатной антенны по площади.

2. Особенности метода проектирования и измерения интегральных антенн

Существующий значительный интерес к области изучения свойств и характеристик электрически малых антенн, которые обладают широким и сверх-широким диапазоном рабочих частот [3]-[5] во многом связан с привлекательностью их для использования в мобильных радиоэлектронных устройствах. Во-первых, они могут обеспечить достаточную ширину полосы для покрытия, требуемого рабочего диапазона частот, часто с отношением граничных частот рабочего диапазона до 10:1. Во-вторых, позволяют достигать малых габаритных размеров антенной конструкции для размещения на одной плате с приёмо-передающим модулем и экономии использованного пространства и, как следствие, стоимости печатной платы.

Миниатюризация устройств радиосвязи возможна за счет компактного расположения антенной и радиоэлектронной частей. Например, за счет совместного использования площади печатной платы антенной, обладающей значительной апертурой, и радиоэлектронной схемой. Компактные схемы приёмо-передатчиков могут быть расположены на широких плечах печатных дипольных антенн, обладающий широкополосными свойствами. Или, схема приёмо-передатчика может быть

расположена на земляном плече печатной монополярной антенны, представляющей собой несимметричную дипольную антенну.

Особенности разработки таких печатных интегральных антенн, во-первых, связаны с учетом эффектов взаимодействия (электромагнитной совместимости) цепей приема-передающей схемы, управления и питания с антенной структурой и, как следствие отличия характеристик итоговой интегральной антенны, от идеальной антенны без приема-передающих цепей. Во-вторых, необходимо применение мелкой сетки разбиения при электромагнитном моделировании интегральной антенны с приема-передающими цепями, что в свою очередь требует серьезных вычислительных мощностей и значительного временного ресурса на расчет каждого из вариантов топологии. В-третьих, значительная сложность связана с итерационным процессом разработки и последующей оптимизацией интегральных антенн, и многократным повторением ресурсоемких процессов численного моделирования.

Для решения задачи разработки подобных антенн, была предложена методология проектирования и измерения печатных интегральных антенн [2]. Концептуально методология представлена на рис. 1. и состоит из следующих этапов: (1) анализ требований, дизайна устройства и определение требований к антенне, включая максимально допустимые габаритные размеры, ее форм-фактор, (2) проектирование идеальной изолированной антенны по заданным требованиям в отсутствие цепей приема-передающего модуля, (3) определение устойчивости характеристик по отношению к основным геометрическим параметрам структуры антенны, формирование ограничений к печатной топологии приемо-передатчика, (4) итеративное проектирование топологии приемо-передатчика с последующим электромагнитным анализом и оптимизацией структуры модуля в целом.

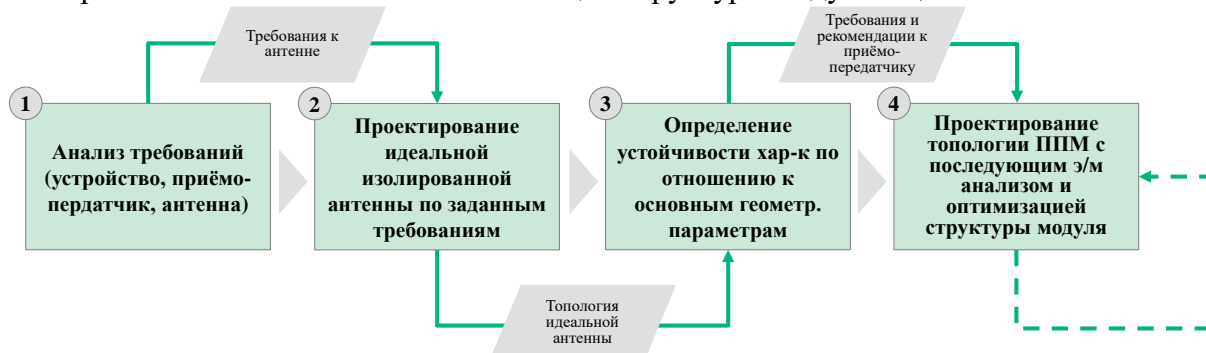


Рис. 1. Диаграмма методологии проектирования интегральных антенн

Экспериментальная верификация рассчитанных характеристик антенны затруднена в связи с двумя факторами. Во-первых, интегральное исполнение самой антенны не имеет порта, разъёмного соединения между антенно-фидерной системой и приемо-передатчиком, причем цепи приемо-передатчика являются неотъемлемой частью антенной структуры, так как расположены непосредственно на одном плече несимметричного диполя. Таким образом просто невозможно отключить интегральную антенну от ее приемо-передатчика и подключить к измерительному устройству. Во-вторых, измерительная оснастка будет оказывать влияние на характеристики антенны. Для измерения характеристик было использовано три способа, каждой из которых в отдельности не воспроизводит полностью все условия эксплуатации антенны, но в совокупности позволяют оценить большинство эффектов.

Для проверки характеристик интегральной антенны был использован метод запитки ее коаксиальным кабелем, подпаянным в разрыв фидерной полосковой линии, соединяющей антенну и приемо-передатчик. Такой способ измерения характеристик антенн не является точным из-за плохого согласования в точке запитки, и как

следствие, возбуждения стоящих волн в фидерном кабеле, значительно изменяющих итоговую АЧХ входного согласования. Второй фактор неточности метода заключается в возможности возбуждения токов на внешней оплетке коаксиального кабеля. Для предотвращения этого эффекта использовался гаситель в виде ферромагнитного кольца.

Для экспериментального подтверждения применимости подобного метода измерения интегральной антенны предложено провести экспериментальное сравнение характеристик для двух вспомогательных образцов: (1) идеальной антенны без цепей приемо-передатчика, запитанной с помощью длинной фидерной линии и измерительного торцевого разъема, обеспечивающего хорошее согласование и (2) такой же идеальной антенны, но запитанной с помощью коаксиального кабеля, подпаянного в разрыв фидерной линии.

3. Печатная интегральная монополярная антенна для СШП прямохаотического приемо-передающего модуля

В качестве антенны для модуля на основе прямо хаотического приёмопередатчика диапазона 3-5 ГГц была выбрана печатная интегральная монополярная антенна. В статье представлен численный электромагнитный и экспериментальный анализ разработанной антенны. Область земляного электрода антенны использована для размещения схемы приёмопередатчика, что позволило значительно снизить эффективный размер устройства, но потребовало более точной разработки с учётом требований электромагнитной совместимости устройства с антенной.

Типичная конфигурация печатной дисковой монополярной антенны представленная на рис. 2 состоит из прямоугольного экрана длиной l , шириной w и диска диаметром d расположенным на одной подложке с экраном (возможно в разных слоях) на расстоянии Δ от экрана. Возбуждение структуры происходит в самом узком месте между экраном и площадкой. Широко распространены так же антенны с площадками других геометрических форм. Антенна может возбуждаться как микрополосковой, так и копланарной волноведущими линиями. В свою очередь сигнал на волноведущую линию подается или через коаксиальный разъём, или напрямую от приёмопередатчика, в случае его интегрального расположения на одной подложке с антенной.

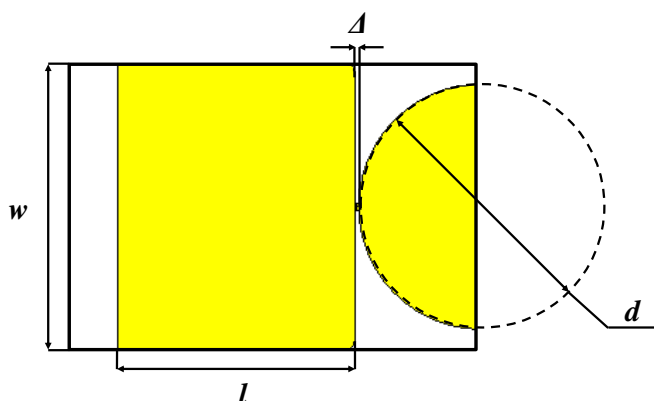


Рис. 2. Типичная конфигурация печатной монополярной усечённой дисковой антенны

В таб. 1 приведены габаритные и технические требования к разрабатываемой антенне, которые были определены из анализа требований к разрабатываемому беспроводному устройству [3].

Таблица 1. Габаритные и технические требования к антенне

	Требования к антенне для модуля 50 × 35
Диапазон рабочих частот	3,0 – 5,0 ГГц
КСВН	<2, при 3,0 ГГц < f < 5,0 ГГц
Направленность антенны	Всенаправленная (КНД < 5 dBi)
Поляризация	Линейная
Подложка	FR-4 ($\epsilon=4,5$), с толщиной 0,6 мм
Габаритные размеры подложки	Не более 50 мм × 35 мм
Габаритные размеры платы приёмопередатчика	$l = 29,1$ мм, $s = 35$ мм, толщина металлизации $d = 18$ мкм
Габаритные размеры диска антенны	$d = 15$ мм
Габаритные размеры питающего полоска	$w = 0,8$ мм, $l = 0,2$ мм,
Возбуждение	Микрополосковой линией или копланарной линией, $Z = 50$ Ом

Отметим, что предложенная антенна близка к фундаментальному пределу Густафсона [6]-[9] при заданных в таб. 1 характеристиках и соотношении сторон.

Проектирование устройств и печатной интегральной монополюсной антенны осуществлялось согласно методологии предложенной в п.2 статьи. На первых этапах были сформулированы технические требования к антенне, приведённые в таб. 1, и спроектировали идеальная уединенная антенна без цепей приемо-передатчика (см. характеристики на рис.3). Дальнейший анализ токов возбуждаемых в антенной структуре показал, что так как основная возбуждаемая мода продольная, то топология схемы приемо-передатчика не должна изменять эффективную длину земляного плеча антенны. А значит, во-первых, стоит избегать длинных поперечных разрезов, а во-вторых, непосредственного укорочения длины антенны, за счёт размещения разъемов и т.д. Несколько вариантов (итераций) топологии схемы приемо-передающего устройства были разработаны с учётом этих рекомендаций. Численное моделирование полной топологии устройства, включающего как антенну, так и приемо-передатчик были выполнены в пакете CST [10]. Итоговая топология устройства приведена на рисунке 4.

4. Экспериментальная верификация разработанной антенны

Для экспериментальной верификации характеристик антенны согласно методологии, описанной в п.2, было изготовлено 3 образца.

Образец 1 – идеальная антенна без цепей приемо-передатчика (сплошная земля), запитанная через длинную копланарную линию, подключенную к торцевому разъему. Такой способ подключения VNA позволяет сделать точную калибровку на референсную плоскость, совмещенную с торцевым разъемом и добиться максимального совпадения условий измерения и моделирования антенны. Однако измеренная и расчётные характеристики могут отличаться от действительной за счет трансформации импеданса длинной волноведущей копланарной линией. Для того, чтобы получить реальный импеданс структуры, нужно скорректировать измеренную S-матрицу на S-матрицу волноведущей линии, обеспечив вычитание вклада волноведущей линии. Проблема заключается в том, что этот вклад известен не точно. Помимо этого, копланарная линия добавляет продольный разрез «земли», в то время, как «земля» является излучающим элементом антенны, что искажает измеренную характеристику антенны. Фактически такой метод позволяет подтвердить корректность расчета, но не позволяет определить реальные характеристики антенны.

Образец 2 – идеальная антенна без цепей приемо-передатчика (сплошная земля), запитанная через отрезок коаксиального кабеля в точке естественной запитки антенны. В следствие естественной запитки, распределение токов в образце будет максимально

приближено к реальному. При этом на точность измерения характеристик антенны будут оказывать влияния два фактора: 1) возможность возбуждения токов, ко внешней оплетке коаксиального кабеля, 2) возбуждение стоячих волн в отрезке коаксиального кабеля из-за плохого согласования в точке пайки кабеля к антенне. Первый фактор может быть подавлен с помощью ферритовых колец. Второй фактор приводит к искажению измеренной экспериментально частотной характеристики и может быть численно устранён фильтрацией частотной зависимости импеданса. Такой способ не позволяет провести точное сравнение расчётной и измеренной характеристик из-за сильного отличия в условиях измерения и расчета. В совокупности сравнение измеренных и расчетных характеристик образцов 1 и 2 между собой позволяют сделать вывод о применимости способа измерения характеристик интегральной антенны с помощью запитки ее через подпаянный в разрыв фидерной линии отрезок коаксиального кабеля, а также оценить точность такого метода. Как видно из рисунка 4 огибающие профилей рассчитанной численно характеристики и измеренной с помощью коаксиального кабеля совпадают, а также совпадает нижняя рабочая частота антенны. Отличие нижней рабочей частоты антенны для образца 1 может быть объяснено эффектами наличия коаксиального разъема, неучтенного в модели.

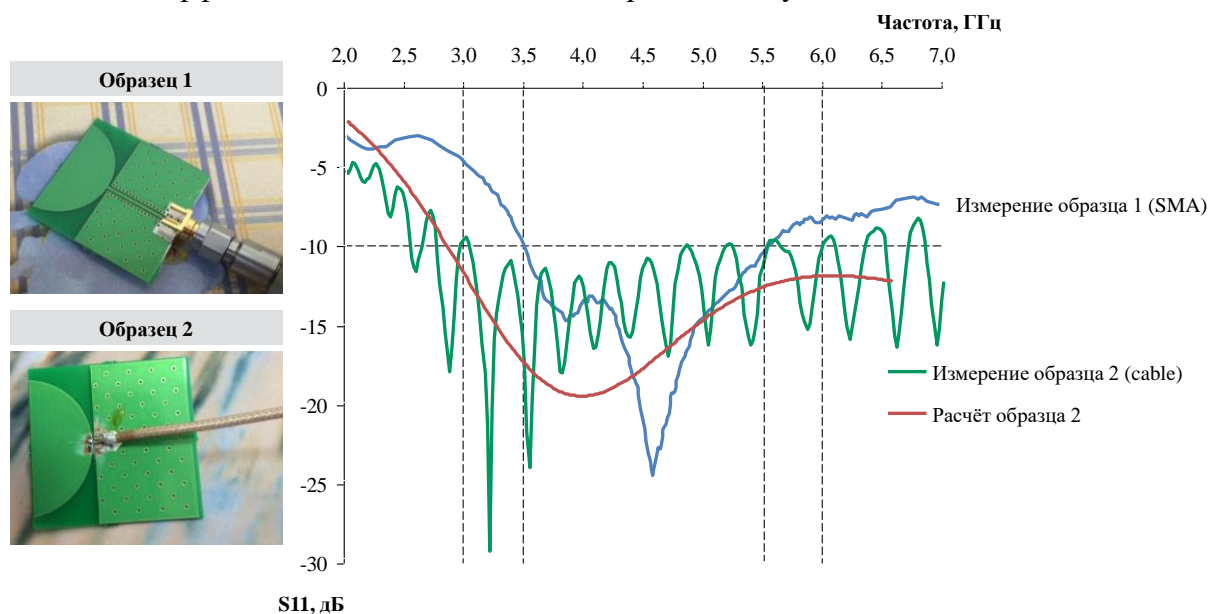


Рис. 3. Сравнение расчётных и измеренных характеристик для образцов 1 и 2

Образец 3 – интегральная антенна, запитанная через отрезок коаксиального кабеля, подпаянного в разрыв копланарной фидерной линии. Несмотря на то, что в измеренной характеристике так же, как и для образца 2 будет наблюдаться эффект стоячих волн в коаксиальном кабеле, важно, что именно этот метод позволяет наблюдать эффекты, связанные с интегральным положением антенны и схемы приёмопередатчика на единой печатной плате. Совпадение профилей огибающих рассчитанной и измеренной характеристик (см. рис. 4) позволяет сделать вывод о применимости разработанной антенны.

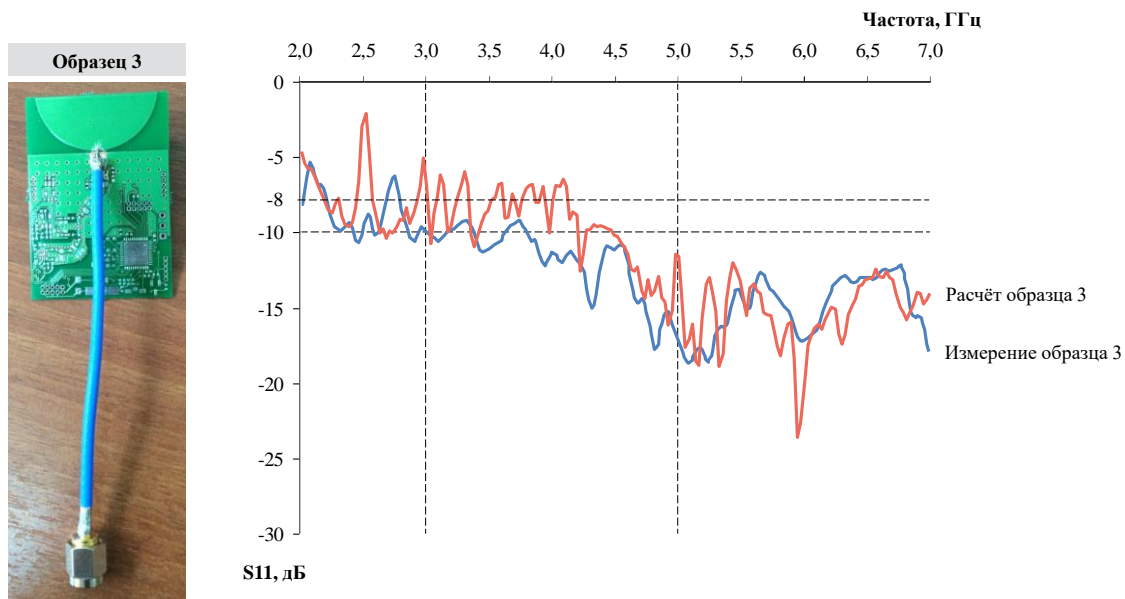


Рис. 4. Сравнение расчётных и измеренных характеристик для образца 3

Заключение

В работе предложена печатная монополярная антенна для беспроводного приемо-передающего модуля диапазона 3-5 ГГц, на основе прямо-хаотического генератора. Применена методология к проектированию и измерению интегральных печатных антенн. Полученные результаты численного электродинамического моделирования антенны были подтверждены экспериментальными измерениями опытных образцов.

Литература

1. А. В. Уваров, Частотные характеристики печатной дисковой монополярной антенны, *Успехи современной радиоэлектроники*, №3, 2013, стр. 103-109
2. A. V. Uvarov, M. Yu Gerasimov, A. V. Uvarov, Designing a Printed Miniature Antenna for 3-5 GHz Range Integrated on PCB with UWB Direct Chaotic Transceiver Module, *PIERS 2017 proceedings* (approved for publication)
3. А. С. Дмитриев, А. В. Клецов, А. М. Лактюшкин, А. И. Панас, В. Ю. Синякин, Сверхширокополосная СВЧ приемопередающая платформа на основе хаотических сигналов, *Радиотехника*, 2007, №1.
4. E. V. Efremova, A. A. Chebelev, The logarithmic detector for chaotic radio pulses 3-5 GHz range based on CMOS 65 nm technology, *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki (Achievements of Modern Radioelectronics)*, 2013, №3, p. 99-102.
5. S. Dmitriev, E. Efremova, M. Gerasimov, V. Itskov, Radio lighting based on dynamic chaos generators, *Electronic preprint arXiv:1609.08444 [physics.gen-ph]*, 2016
6. M. Gustafsson, Physical limitations on antennas of arbitrary shape, *Proc. R. Soc. A* (2007) 463, 2589–2607
7. M. Gustafsson, M. Cismasu, B.L.G. Jonsson, Physical bounds and optimal currents on antennas, *IEEE-TAP*, 2012
8. M. Cismasu, M. Gustafsson, Antenna Bandwidth Optimization with Single Frequency Simulation, *IEEE-TAP*, 2014.
9. Mats Gustafsson, Doruk Tayli and Marius Cismasu, Physical Bounds of Antennas, *Handbook of Antenna Technologies*, pp.1-32, 2015
10. CST Microwave Studio, <http://www.cst.com/>