

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

А.В. Уваров<sup>1,2</sup>, А.В. Уваров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия, [anton.uvarov@phystech.edu](mailto:anton.uvarov@phystech.edu)

<sup>2</sup>Федеральное 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 приемопередатчика, (4) итеративное проектирование топологии приемопередатчика 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 приемопередатчиком, причем цепи приемопередатчика являются неотъемлемой частью антенной структуры, так как расположены непосредственно на одном плече несимметричного диполя. Таким образом просто невозможно отключить интегральную антенну от ее приемопередатчика 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 приемопередатчик. 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  $\Delta$  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.

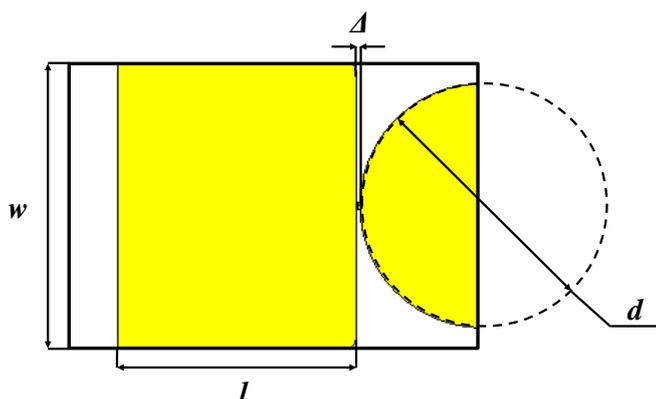


Рис. 2. Типичная конфигурация печатной монополярной усечённой дисковой антенны

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.

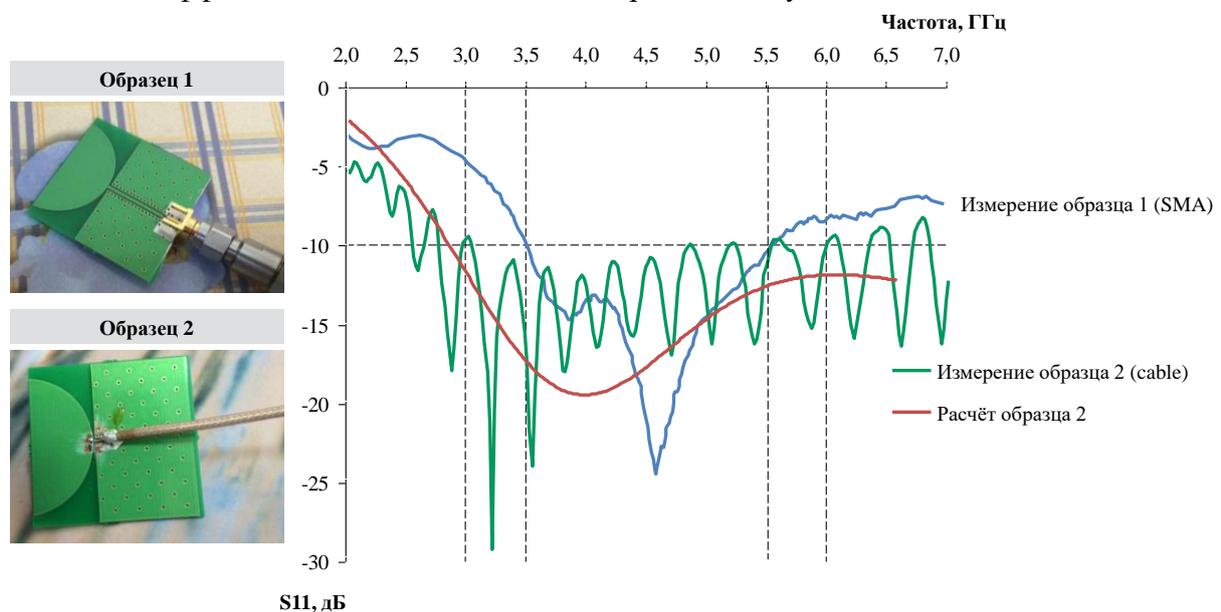
#### 4. Экспериментальная верификация разработанной антенны

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 разьему. 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.

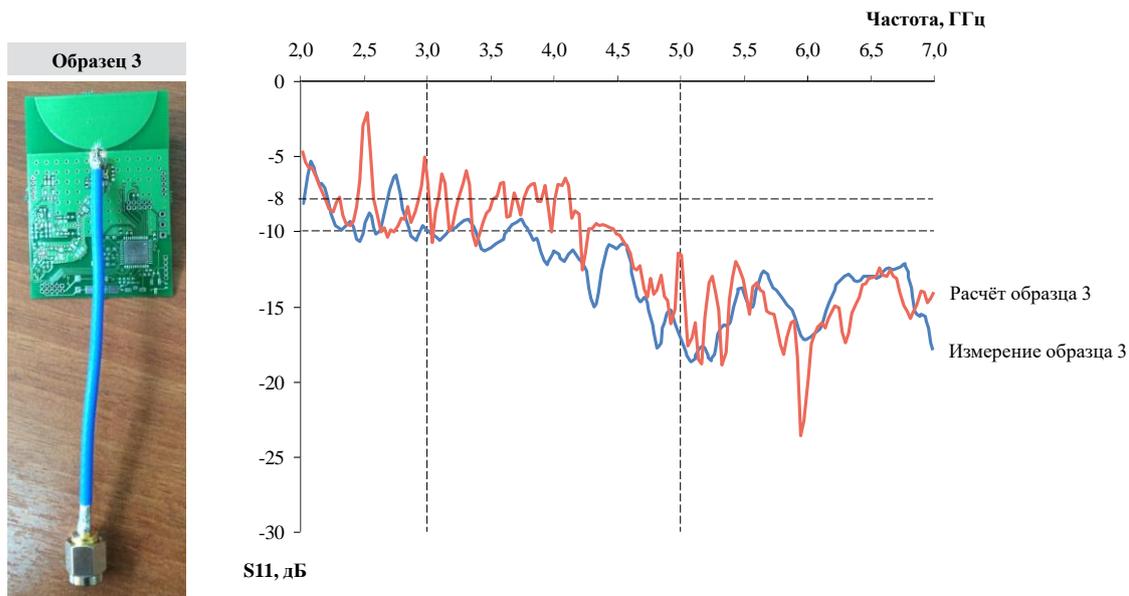


Рис. 4. Сравнение расчётных и измеренных характеристик для образца 3

### 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/>