

# Проектирование, моделирование и составление документации при разработке беспроводных систем на базе патентованных технологий

Одна из наиболее характерных особенностей рынка электроники в последние несколько лет заключается в принятии многочисленных стандартов беспроводной связи малого радиуса действия, таких как Bluetooth, различные варианты WiFi, ZigBee, а также новых стандартов наподобие Wibree/Bluetooth ULP и Ultra Wideband.

Остин Харни

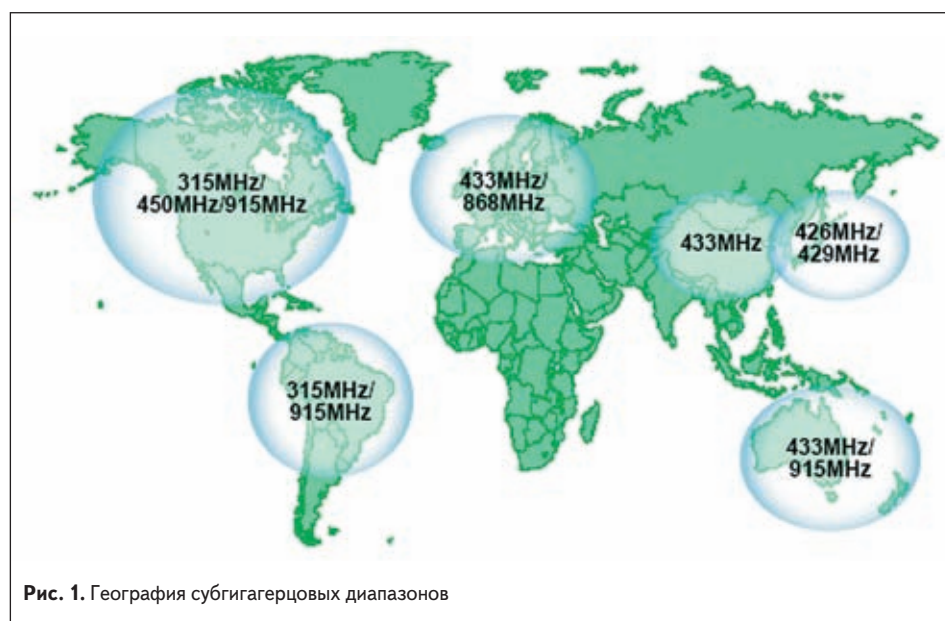
## Введение

Практичный разработчик, столкнувшийся с задачей организации беспроводной связи между двумя и более устройствами, как правило, в первую очередь рассматривает именно эти стандарты, однако они не всегда наилучшим образом удовлетворяют требованиям конкретного приложения.

Одна из причин этого кроется в том, что большинство данных стандартов рассчитано на нелицензируемый диапазон на частоте 2,4 ГГц, который глобально доступен и имеет ширину полосы порядка 84 МГц. Однако сложности, вызванные проблемой совместимости систем разных стандартов при работе в диапазоне 2,4 ГГц и малой дальностью распространения при заданном бюджете мощности системы, порождают повышенный интерес разработ-

чиков к более низкочастотным диапазонам УВЧ. Среди этих диапазонов наиболее типичными являются диапазоны 868 МГц и 433 МГц в Европе, 902–928 МГц в США и 426 МГц в Японии. Они обычно обозначаются общим термином «субгигагерцовые диапазоны» (subGHz bands) и включают в себя также ряд других нелицензируемых диапазонов на частотах ниже 1 ГГц. Из-за недостатка в стандартах беспроводной связи, описывающих работу в субгигагерцовых диапазонах, разработчики, как правило, применяют патентованные стек протоколов связи и средства физического уровня (PHY), которые могут быть настроены под нужды их приложения.

На рис. 1 показана география распространения большинства нелицензируемых субгигагерцовых диапазонов.



### Моделирование субгигагерцовых беспроводных систем связи

Преимущество применения беспроводных стандартов наподобие WiFi или Bluetooth заключается в том, что рабочими группами, занимающимися отдельными стандартами, уже определены скорость передачи данных, тип модуляции, выходная мощность и частотная сетка, и разработчику не нужно заботиться о соответствии параметров его системы национальным частотным регламентам. Так, например, разработчики систем на основе стандарта Bluetooth могут быть уверены в том, что заданные в стандарте параметры системы удовлетворяют параметрам, определенным в рекомендациях EN 300 440 и FCC Part 15, которые регламентируют работу в диапазоне ISM 2,4 ГГц (максимально допустимой излучаемой мощности, максимальной ширины полосы модуляции, частотной маски излучения и минимального количества каналов перестройки частоты).

В субгигагерцовых диапазонах проблема несколько иная. Из-за фрагментированной природы субгигагерцовых диапазонов стандартов для них разработано меньше, поэтому большинство разработчиков систем, работающих в этих диапазонах, используют патентованные беспроводные протоколы, оставляющие за ними свободу выбора различных параметров системы. Рискованность такого подхода состоит в том, что выбор отдельных комбинаций параметров может привести к несоответствию системы требованиям национальных регламентирующих документов. Пакет ADI SRD Design Studio разработан специально для того, чтобы пользователи могли промоделировать различные варианты до работы с реальным устройством в лаборатории. Он руководит действиями пользователя на всех этапах проектирования, учитывая при этом требования соответствующих регламентирующих документов. На рис. 2 проиллюстрированы основные инструменты, входящие в состав пакета ADI SRD Design Studio.

В процессе проектирования системы разработчику необходимо рассмотреть различные вопросы, связанные с построением отдельных подсистем и выбором их параметров: оптимизация схемы ФАПЧ, ВЧ-фильтрация и построение согласующих цепей, выбор типа модуляции и скорости передачи данных, процесс демодуляции, форматирование пакетов данных, оценка средней потребляемой мощности и т. д. Оптимальные комбинации этих параметров и методов обычно подбираются разработчиками при помощи программ табличных измерений, а также путем поэтапного совершенствования характеристик по результатам проведения испытаний в лабораторных условиях. Для анализа параметров во временной области можно воспользоваться симулятором на основе моделей SPICE, однако точное моделирование фазового шума в частотной области может быть выполнено, как правило, только при использовании специализированных программных продуктов. Другой вариант заключается в обеспечении оптимизации системы путем подстройки ее параметров по результатам эксперименталь-

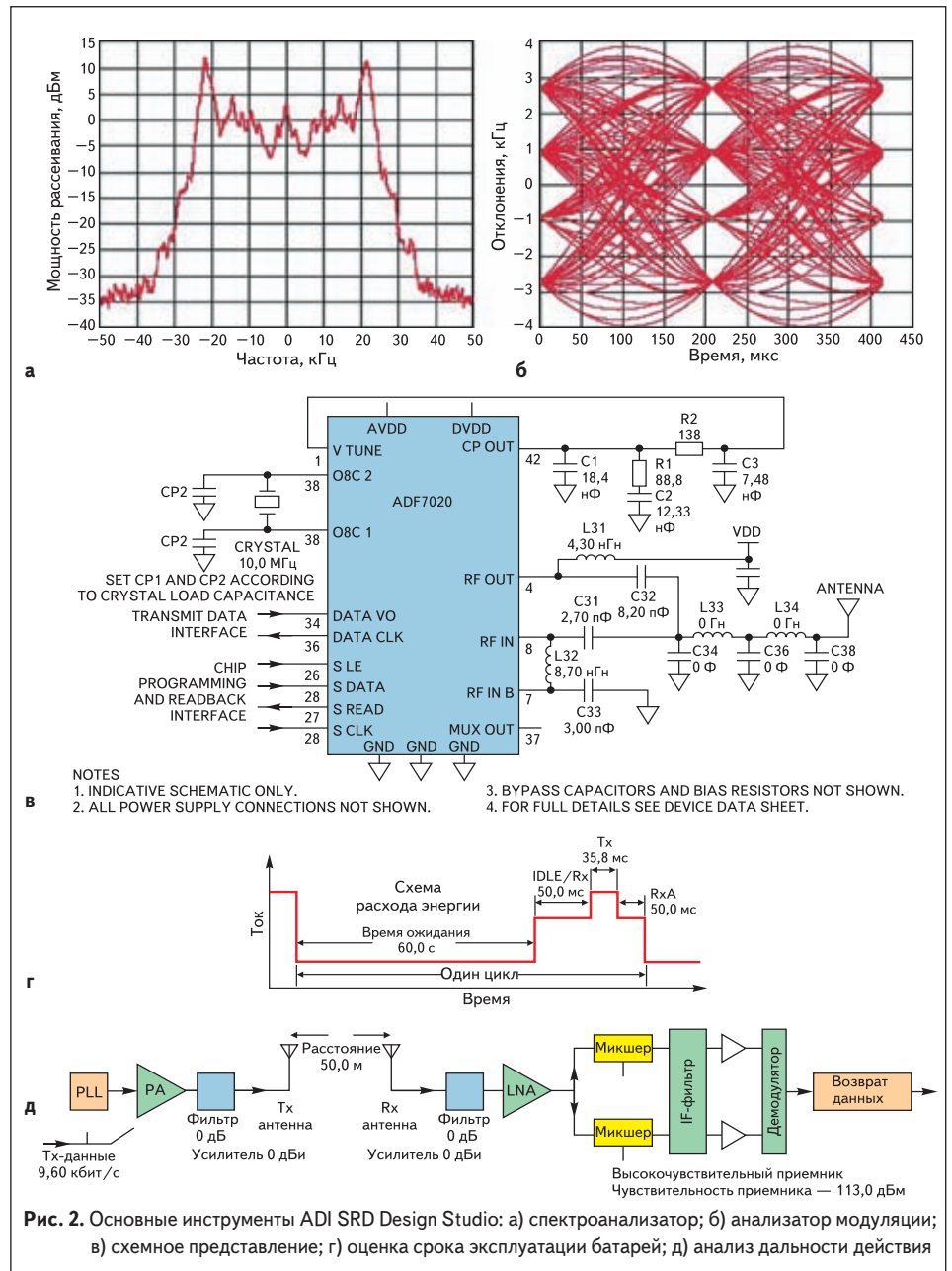


Рис. 2. Основные инструменты ADI SRD Design Studio: а) спектроанализатор; б) анализатор модуляции; в) схемное представление; г) оценка срока эксплуатации батарей; д) анализ дальности действия

Таблица 1. Перечень инструментов ADI SRD Design Studio

| № | Название задачи                                 | Описание   |
|---|---|--|
| 1 | Мастер нового проекта                           | Включает в себя стандартные настройки параметров для различных региональных регламентирующих документов (FCC, ETSI, ARIB и т. д.)                                  |
| 2 | Расчет бюджета канала                           | Позволяет проводить оценку дальности действия с использованием различных моделей распространения и границ замирания  |
| 3 | Электронная таблица частот                      | Помогает при выборе частот XTAL и PFD для различных комбинаций рабочих частот и скорости передачи данных   |
| 4 | Просмотр спектра сигнала передатчика            | Спектроанализатор с крайне гибкими функциональными возможностями (на базе БПФ)   |
| 5 | Форматирование пакетов                          | Позволяет задавать структуру пакетов и анализировать ее влияние на время эксплуатации элементов питания и частоту ошибок в пакете (PER, packet error rate)         |
| 6 | Выбор синхроследовательности для детектирования | Помогает подобрать байт синхроследовательности с хорошими свойствами автоматической коррекции, при использовании которого будут минимизированы ложные срабатывания |
| 7 | Оценка потребления мощности                     | Используется для расчета времени эксплуатации элементов питания. Позволяет проанализировать различные комбинации времени ожидания, передачи и приема               |
| 8 | Схемное представление                           | Генерирует схему включения с учетом различных параметров системы (например, фильтра контура, катушки индуктивности ГУН, резонатора и схемы согласования)           |

ных измерений. Однако этот вариант требует многократных походов в лабораторию и может стать слишком дорогостоящим.

Чтобы помочь разработчику преодолеть эти трудности, компания Analog Devices был выпущен бесплатный программный пакет под названием ADI SRD Design Studio, позволяющий моделировать и оптимизировать различные параметры систем на базе микросхем семейства передатчиков и трансиверов ADF7xxx. Этот пакет основан на популярном пакете ADIsimPLL, возможности которого были дополнены функциями просмотра характеристик модулированного сигнала как во временной, так и в частотной области при помощи виртуального спектроанализатора. Помимо этого ADI SRD Design Studio значительно упрощает общую процедуру проектирования, создавая поэтапный путь, которому может следовать разработчик, и разбивая процесс проектирования на ряд дискретных задач, которые описаны в таблице 1.

## Обзор принципов работы пакета

Ядром пакета ADI SRD Design Studio является библиотека моделей микросхем ADF7xxx, содержащих параметризованные данные для каждого устройства: фазовые шумы синтезатора и ГУН, коэффициент усиления ГУН, доступные варианты типов фильтров данных, чувствительность, коэффициент шума и другие. Эти модели используются для проведения нелинейного анализа во временной области, при котором ВЧ несущая модулируется последовательностью отсчетов данных, и на выходе получаются отсчеты сигнала ГУН во времени. Возможен выбор из двух вариантов последовательностей модулирующих данных: псевдослучайная (PRBS) или периодическая (010101) последовательность. В отличие от традиционного линейного анализа в пакете точно моделируются такие нелинейные эффекты, как затягивание частоты ГУН, нелинейность коэффициента передачи ГУН и насыщение схемы «зарядового насоса». Для формирования выходного изображения спектроанализатора вычисляется БПФ от сигнала во временной области.

Как и при работе с реальным коммерческим спектроанализатором, в режиме спектроанализатора пользователь может изменять различные его параметры: полосу разрешения, тип детектора и количество итераций перестройки частоты. Полоса разрешения может задаваться в пределах от 100 Гц до 300 кГц, а полоса просмотра — в интервале от 1 кГц до 3 МГц. Пользователь также может задавать тип детектора — пиковый или усредняющий, в зависимости от чего каждый отсчет БПФ на выходе спектроанализатора будет соответствовать максимальному либо среднему значению уровня. Возможность изменения этих параметров является очень полезной функцией, поскольку в каждом стандарте предъявляются свои требования к проведению измерений, среди которых и требования к полосе разрешения, полосе просмотра и типу детектора, которые должны использоваться при работе с измерительным оборудованием. Все эти требования

Таблица 2. Перечень измерений со стандартными настройками в режиме спектроанализатора

| Номер теста | Регламентирующий документ | Тестовое измерение                             |
|-------------|---------------------------|--|
| 1           | ETSI EN 300 220           | Ширина полосы частот модуляции                 |
| 2           | ETSI EN 300 220           | Мощность в соседнем канале                     |
| 3           | ETSI EN 300 220           | Занимаемая ширина полосы                       |
| 4           | FCC 15.231                | Ширина полосы по уровню –20 дБ                 |
| 5           | FCC 15.247                | Ширина полосы по уровню –20 дБ                 |
| 6           | FCC 15.247                | Ширина полосы по уровню –6 дБ                  |
| 7           | FCC 15.247                | Спектральная плотность мощности в полосе 3 кГц |
| 8           | FCC 90.210                | Маска D-излучения                              |
| 9           | FCC 15.249                | Ширина полосы по уровню –20 дБ                 |
| 10          | FCC 15.231 (b)            | Напряженность поля                             |
| 11          | FCC 15.231 (e)            | Напряженность поля                             |
| 12          | ARIB STD-T67              | Занимаемая ширина полосы (25 кГц)              |
| 13          | ARIB STD-T67              | Занимаемая ширина полосы (12,5 кГц)            |

учитываются симулятором в различных тестах со стандартными настройками, доступными в режиме спектроанализатора. Стандартные тесты, которые перечислены в таблице 2, позволяют пользователю быстро производить тестирование на соответствие системы конкретному стандарту без детального изучения документации.

В дополнение к режиму спектроанализатора и режиму анализа переходных процессов пакет также позволяет производить анализ схемы ФАПЧ в частотной области для нахождения номиналов компонентов фильтра контура ФАПЧ, а также оценки запаса по фазе и коэффициенту усиления. Изменяя ширину полосы контура ФАПЧ в процессе моделирования, пользователи могут наблюдать ее влияние на спектр модулированного сигнала передатчика. Данный режим позволяет оптимизировать параметры контура фильтра, не полагаясь на базовые рекомендации или таблицы производителей фильтров, данные в которых соответствуют не всем возможным условиям. При типовых настройках моделирование во всех трех основных режимах производится менее чем за две секунды.

## Модели распространения

Еще одним полезным инструментом пакета ADI SRD Design Studio является электронная таблица анализа канала передачи, которая используется для оценки бюджета канала и дальности действия при различных условиях. Как и все остальные инструменты, она интегрирована в основной симулятор. Изменение скорости передачи данных для приведения параметров излучения в соответствие с определенной в регламентирующих документах маской приводит к изменению бюджета канала и, как следствие, к изменению дальности распространения сигнала. Эта возможность дает преимущество перед использованием набора автономных инструментов, поскольку изменение одного параметра (например, скорости передачи данных) будет иметь эффект во всех остальных электронных таблицах.

При проведении анализа канала сначала вычисляется его бюджет, то есть разница между

излучаемой мощностью и чувствительностью приемника, учитывая любые потери в фильтре или антенне. Блок-схема, используемая в пакете для проведения анализа канала, показана на рис. 2д.

Затем можно определить дальность действия. Для этого необходимо увеличивать расстояние между антеннами в модели, пока потери на трассе распространения радиосигнала не сравняются с бюджетом канала (то есть пока не будет достигнута точка, при которой энергетический запас в канале передачи станет равным 0 дБ). Потери на трассе вычисляются в соответствии с одной из выбираемых пользователем моделей распространения сигнала: моделью свободного пространства, моделью распространения над земной поверхностью и простой моделью распространения внутри помещения.

### Модель распространения в свободном пространстве

В модели распространения в свободном пространстве предполагается, что между передатчиком и приемником нет препятствий или каких-либо значимых отражающих объектов (включая поверхность Земли). Следующая формула дает оптимистический прогноз дальности распространения для большинства практических вариантов размещения излучателя и приемника:

$$P_L = 20 \log_{10}(\lambda/4 \pi/R),$$

где  $R$  — расстояние между передатчиком и приемником,  $\lambda$  — длина волны, а  $P_L$  — потери на трассе распространения радиосигнала.

### Модель распространения над земной поверхностью

В данной модели передатчик и приемник подняты относительно плоской земной поверхности на высоту  $h_T$  и  $h_R$  соответственно, а расстояние между ними равно  $R$ :

$$P_L = 20 \log_{10}(h_T h_R / R^2).$$

Приведенная выше формула дает довольно точные результаты для осуществления беспрепятственной

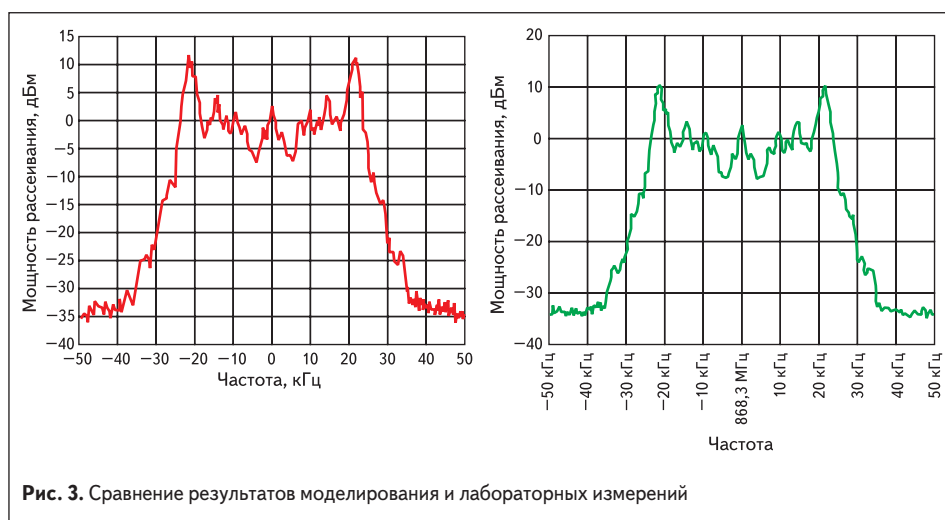


Рис. 3. Сравнение результатов моделирования и лабораторных измерений

связи в условиях прямой видимости, например на пляже или относительно широком участке дороги. Использование этой модели показывает, что при помощи устройств семейства ADF7xxx можно достичь дальности распространения более 3 км без применения внешнего усилителя мощности или малошумящего усилителя.

#### Простая модель распространения внутри помещения

Эта модель описывается выражением:

$$P_L = 10 \log_{10}(P_0 R^{-n}) = 20 \log_{10}(\lambda/4 \pi/R) - 10n \log_{10} R,$$

где  $P_0$  — потери на трассе распространения на расстоянии 1 м, а  $n$  — степенной показатель, величина которого зависит от окружающей обстановки. В [3] дан ряд значений показателя  $n$  для различных условий распространения, например в заводском цеху, многоэтажном офисном здании и т. д. Большинство разработчиков просто подбирают значение  $n$  эмпирическим путем.

Еще один полезный инструмент, входящий в состав ADI SRD Design Studio, — это электронная таблица форматирования пакетов. Она позволяет пользователю вводить формат пакета и исследовать влияние длины пакета на срок действия аккумулятора, подбирать формат слова синхронизации, который обеспечит малую вероятность ложного срабатывания, а также переводить значение частоты ошибок на бит (BER, bit error rate) в значение частоты ошибок на пакет (PER, packet error rate), исходя из длины пакета. Возможность преобразования BER в PER весьма полезна, поскольку некоторые производители ИС указывают чувствительность через BER, а некоторые — через PER.

#### Лабораторная проверка настроек, полученных при моделировании

После завершения моделирования и получения приемлемых результатов настроечные параметры (частота, скорость передачи данных, тип модуляции и т. д.) могут быть сохранены в файл и экспортированы в программное обеспечение программирования микросхем ADF7xxx

для проведения контрольного теста в лабораторных условиях. Как показано на рис. 2г, результаты контрольного теста хорошо согласуются с результатами моделирования (тест производился для сигнала GFSK со скоростью передачи 9,6 кбит/с на частоте 868 МГц). При сравнении результатов необходимо следить за тем, чтобы используемый в симуляторе фильтр контура ФАПЧ совпадал с реальным фильтром на плате, поскольку он влияет на форму спектра выходного сигнала.

#### Заключение

Пакет ADI SRD Design Studio был выпущен в 2007 году и на момент написания этой статьи был загружен пользователями более 5000 раз. Поскольку Analog Devices постоянно совершенствует программное обеспечение, пользователи могут сообщать об ошибках и вносить предложения по следующей ревизии продукта на онлайн-форуме. Он размещен на веб-сайте Radiolab ([www.radiolab.com.au](http://www.radiolab.com.au)), ссылка на который имеется в ADI SRD Design Studio. На этом веб-сайте также периодически выкладываются «заплатки» и обновления программного обеспечения.

По мере расширения компанией Analog Devices линейки микросхем для беспроводной связи ADI SRD Design Studio будет пополняться описанием новых устройств с различными рабочими частотами и форматами модуляции. Пакет ADI SRD Design Studio является очень полезным инструментом для проектировщиков систем беспроводной связи и просто необходим любому, кто ведет разработку с применением микросхем семейства передатчиков и трансиверов ADF7xxx компании Analog Devices. ■

#### Литература

1. [www.analog.com/srddesign](http://www.analog.com/srddesign)
2. Harney A., O'Mahony C. Wireless Short-Range Devices: Designing a Global License-Free System for Frequencies > 1 GHz // Analog Dialogue. Vol. 40. No. 1. March 2006.
3. Hashemi H. The Indoor Radio Propagation Channel // Proc. IEEE. Vol. 81, No. 7. July 1993.