

*Спасибо Жан-Мишелю
за его неиссякаемый энтузиазм
и за то, что убедил меня
присоединиться к миру свободы (Linux)*

Содержание

От издательства	10
Об авторах	11
Предисловие переводчика	12
Сокращения	16
1. Начало работы с GNU Radio: модельные сигналы	18
1.1. Эволюция радиосистем в направлении SDR.....	18
1.2. Комплексная огибающая и объяснение IQ-структуры.....	21
1.3. Обращение с комплексными числами	24
1.4. GNU Radio и GNU Radio Companion	25
1.5. Частоты дискретизации, децимация и наложение спектров.....	31
1.6. Фильтрация нижних частот или работа с верхними зонами Найквиста	36
1.7. Разрешение АЦП и ЦАП	40
1.8. Отображение спектральной плотности мощности с помощью приемника Frequency Sink.....	43
1.9. Заключение	43
Список литературы	45
2. Использование GNU Radio с сигналами SDR	46
2.1. Архитектура аппаратной части SDR	48
2.2. Использование доступных инструментов обработки	49
2.3. Амплитудная модуляция и демодуляция.....	51
2.4. Частотная модуляция и демодуляция.....	58
2.4.1. Коммерческое FM-вещание: демодуляция и вывод звука	63
2.4.2. Стереозвук и RDS	65
2.4.3. FSK-модуляция	66
2.5. Фазовая модуляция и демодуляция	69
2.5.1. Фазовая модуляция	70
2.5.2. Фазовая демодуляция	72
2.5.3. Система передачи данных по радио (RDS)	73
2.5.4. Глобальная система позиционирования (GPS)	75
2.6. Спектральное распределение различных схем модуляции	81
2.7. Проблема с уткой гетеродина	83
2.8. Заключение	85
Список литературы	85

3. Взаимодействие с внешним программным обеспечением (Python, Networking, ZeroMQ, MQTT)	87
3.1. Подключение к внешним средствам декодирования сообщений с помощью именованных каналов.....	88
3.1.1. Одноканальное декодирование POCSAG.....	90
3.1.2. Многоканальное декодирование POCSAG.....	91
3.2. Сервер TCP/IP, работающий в отдельном потоке.....	93
3.3. Протокол XML-RPC.....	103
3.4. Поточковая передача с Zero MQ (0MQ).....	106
3.5. MQTT.....	114
3.5.1. MQTT для Python, Bash и Octave.....	115
3.6. Заключение.....	118
Список литературы.....	118
4. Корреляция: пассивная и активная программно-определяемая радиосистема (SDR) – радар	119
4.1. Требования к SDR-радару и его конструкция.....	119
4.2. Реализация корреляции в GNU Radio.....	124
4.3. Принцип работы пассивного радара и его реализация.....	133
4.4. Принцип работы активного радара и его реализация.....	134
4.5. Принцип измерения.....	135
4.6. От теории к эксперименту: определение дальности с помощью сложения полос частот.....	138
4.7. Результаты.....	143
4.8. Заключение по измерению дальности.....	146
4.9. Разрешение по азимуту за счет пространственного разнесения: радар с синтезированной апертурой.....	147
4.9.1. Радар OFDM (Wi-Fi).....	152
4.10. Получение данных для измерения азимута.....	156
4.11. Подавление помех прямой связи.....	157
4.12. Обработка сигналов.....	158
4.13. Анализ результатов.....	161
4.14. Интерферометрические измерения.....	163
4.15. Воспроизводимое позиционирование приемной антенны: моторизованная направляющая.....	165
4.16. Уголковый отражатель радиосигналов.....	167
4.17. Точное измерение перемещения.....	169
4.18. Влияние атмосферы.....	172
4.19. Измерение времени распространения с дробным разрешением относительно интервала дискретизации и использование совместной цели на поверхностных акустических волнах для моделирования воспроизводимого измерения дальности.....	172
4.20. Заключение.....	177
Список литературы.....	180

5. Цифровая связь в действии: дизайн и реализация QPSK-модема	184
5.1. Принципы цифровой связи	184
5.1.1. Что такое цифровая информация?	184
5.1.2. От цифровых данных к электрическим импульсам	187
5.1.3. Занимаемая полоса и спектральная эффективность	190
5.2. Разработка QPSK-модулятора с помощью GNU Radio	193
5.3. Разработка QPSK-демодулятора с помощью GNU Radio	197
5.3.1. Синхронизация	198
5.3.2. Автоматическая регулировка усиления (АРУ)	213
5.3.3. Сборка всех компонентов: окончательная блок-схема QPSK-приемника	214
5.4. Заключение	217
Список литературы	218
6. Сообщения, теги и пакетная передача данных	219
6.1. Введение	219
6.2. Полиморфные типы	220
6.3. Сообщения	224
6.4. Теги	232
6.5. Примеры применения	238
6.5.1. Усовершенствование модуля OOT gr-nordic	238
6.5.2. Преобразование QPSK-модема в пакетный режим	243
6.6. Заключение	246
Список литературы	247
7. Стандарт цифровой связи: система радиовещания в формате DAB+	248
7.1. Введение	248
7.2. Стандарт DAB+	249
7.2.1. Основы цифрового кодирования звука	249
7.2.2. Стандарты кодирования звука и их использование в DAB и DAB+	254
7.2.3. Цифровая передача по временным и частотно-избирательным каналам: необходимость COFDM	260
7.3. Разработка передатчика DAB+	276
7.4. Создание приемника DAB+ с помощью GNU Radio	280
7.4.1. Основы применения gr-dab	280
7.4.2. Более подробный анализ gr-dab	283
7.5. Заключение	285
Список литературы	285
8. Пакеты QPSK и CCSDS: прием спутникового сигнала Метеор-М 2N	287
8.1. Введение	287
8.2. Когда спутник пролетит над Землей?	291

8.3. Зачем нужен такой сложный протокол?	295
8.4. Как решить эту проблему?	298
8.5. Преобразование радиосигнала в биты	299
8.5.1. Формат данных	302
8.5.2. Декодирование данных	303
8.5.3. Сверточное кодирование слова синхронизации	304
8.5.4. Представление сверточного кода в виде конечных автоматов	306
8.5.5. Декодирование сверточного кода: алгоритм Витерби	308
8.5.6. Вращение созвездия	311
8.5.7. От битов к предложениям: применение алгоритма Витерби для декодирования	314
8.6. От предложений к абзацам	320
8.7. Так много текста... Теперь картинки	323
8.8. Декодирование изображений в формате JPEG	329
8.9. Заключение	336
Приложение 8. Блочный код Рида–Соломона с исправлением ошибок	337
Список литературы	341

9. Пользовательские блоки источника и приемника:

добавление собственного аппаратного интерфейса	343
9.1. Блок Python	345
9.2. Блоки Out-of-Tree	347
9.3. Перекрестная компиляция для работы в автономных встраиваемых системах	358
9.4. Заключение	361
Список литературы	361

Предметный указатель	363
-----------------------------------	------------

От издательства

Отзывы и пожелания

Мы всегда рады отзывам наших читателей. Расскажите нам, что вы думаете об этой книге – что понравилось или, может быть, не понравилось. Отзывы важны для нас, чтобы выпускать книги, которые будут для вас максимально полезны.

Вы можете написать отзыв на нашем сайте www.dmkpress.com, зайдя на страницу книги и оставив комментарий в разделе «Отзывы и рецензии». Также можно послать письмо главному редактору по адресу dmkpress@gmail.com; при этом укажите название книги в теме письма.

Если вы являетесь экспертом в какой-либо области и заинтересованы в написании новой книги, заполните форму на нашем сайте по адресу http://dmkpress.com/authors/publish_book/ или напишите в издательство по адресу dmkpress@gmail.com.

Список опечаток

Хотя мы приняли все возможные меры для того, чтобы обеспечить высокое качество наших текстов, ошибки все равно случаются. Если вы найдете ошибку в одной из наших книг, мы будем очень благодарны, если вы сообщите о ней главному редактору по адресу dmkpress@gmail.com. Сделав это, вы избавите других читателей от недопонимания и поможете нам улучшить последующие издания этой книги.

Нарушение авторских прав

Пиратство в интернете по-прежнему остается насущной проблемой. Издательство «ДМК Пресс» очень серьезно относится к вопросам защиты авторских прав и лицензирования. Если вы столкнетесь в интернете с незаконной публикацией какой-либо из наших книг, пожалуйста, пришлите нам ссылку на интернет-ресурс, чтобы мы могли применить санкции.

Ссылку на подозрительные материалы можно прислать по адресу электронной почты dmkpress@gmail.com.

Мы высоко ценим любую помощь по защите наших авторов, благодаря которой мы можем предоставлять вам качественные материалы.

Об авторах

Жан-Мишель Фридт, доцент Университета Франш-Конте, а также научный сотрудник отдела времени и частот FEMTO-ST, Безансон, Франция. Ранее он работал системным инженером в компании SENSEOR, занимаясь разработкой беспроводных пассивных групповых целей, обнаруживаемых радарными системами малой дальности.

Эрве Боэглен, доцент Университета Пуатье и сотрудник лаборатории XLIM парка Футуроскоп, Франция. Он обладает огромным опытом преподавания и исследований в области цифровых коммуникаций, программно-определяемого радио, встраиваемых систем и смежных дисциплин.

Предисловие переводчика

История появления программно-определяемого радио (в английской терминологии software defined radio – SDR) насчитывает от 30 до 40 лет, но только в последние 10–15 лет оно получило широкое распространение благодаря серийному выпуску недорогих приемников типа RTL SDR. Успеху SDR способствовало и развитие программного обеспечения таких устройств, прошедшего путь от специализированных программ до универсальных сред разработки ПО. Наиболее ярким представителем последнего направления является пакет GNU Radio, с помощью которого в данной книге рассматривается инженерия, т. е. моделирование и проектирование современных телекоммуникационных систем. Причем название книги включает уточнение – A Hands-on Approach, т. е. практический подход. И это главное, но не единственное достоинство данной книги.

Практический подход предполагает внимание к аппаратной компоненте SDR и подробный анализ программ с приведением как блок-схем программ, разработанных в рамках GNU Radio Companion, так и листингов программ, написанных на таких языках, как Python и Octave (бесплатная версия Matlab). И подобное сочетание рассмотрения аппаратной и программной составляющих SDR прослеживается на протяжении всей книги.

Так, в частности, уже в начале первой главы описывается схемотехника и приводятся характеристики наиболее распространенных устройств SDR – недорогих приемников RTL SDR и трансиверов Adalm-Pluto с более широкими функциональными возможностями. На примере этих устройств демонстрируется основная специфика SDR – перенос радиосигнала в основную полосу частот в окрестности нулевой частоты с помощью квадратурного смесителя и дальнейшая цифровая обработка такого комплексного сигнала. Эта обработка выполняется уже с помощью пакета GNU Radio Companion и применяется сначала к модельным или записанным ранее сигналам, а затем и к сигналам, получаемым с указанных выше устройств. На примере такой обработки происходит практическое знакомство с такими, казалось бы, сугубо теоретическими понятиями, как разрешающая способность АЦП, частота дискретизации, преобразование Фурье, спектр, децимация и наложение частот. Здесь же демонстрируются операции свертки и корреляции.

На базе полученных сведений во второй главе рассматриваются темы, имеющие непосредственное отношение к сфере телекоммуникаций, а именно вопросы формирования, передачи и приема модулированных сигналов. Сначала это аналоговая частотная модуляция, широко используемая в FM-вещании, а затем все основные виды цифровой модуляции (манипуляции) – амплитудная, частотная и фазовая. При этом анализ каждого вида модуляции сопровождается не только теоретическими выкладками, но и примерами

реализации в виде блок-схем и графиков, демонстрирующих временное и частотное представление сигналов. Так, в частности, в качестве примера реализации амплитудной манипуляции рассмотрен протокол цифровой связи ACARS самолетов с диспетчерскими пунктами. Аналогичные примеры для фазовой манипуляции включают прием сигнала передачи данных (RDS) в составе FM-трансляции и сигнала глобальной системы позиционирования (GPS). Последние примеры привлекают внимание к проблеме рассогласования частот гетеродинов передатчиков и приемников вследствие как неточности настройки, так и влияния эффекта Доплера.

В третьей главе акцент сделан на анализе взаимодействия GNU Radio с внешним программным обеспечением, которое позволяет использовать наиболее эффективный язык описания или соответствующие библиотеки. При этом рассматриваются такие методы обмена данными, как именованный канал на базе буфера FIFO, клиент-серверное взаимодействие через сетевые сокеты, протокол XML-RPC, библиотека обмена сообщениями ZeroMQ и, наконец, протокол MQTT. В качестве практических примеров применения данных технологий приводятся решения по одноканальному и многоканальному декодированию сообщений протокола POCSAG для пейджеров.

В четвертой главе на основе всех этих знаний демонстрируется методика сборки различных архитектур как пассивных, так и активных SDR-радаров с непрерывным излучением. При этом широко используются такие методы обработки, как прямое и обратное преобразования Фурье, а также свертка передаваемого и принимаемого сигналов. В результате удастся определить не только дальность и скорость цели, но и ее азимут. Для оценки последней величины реализуется некий аналог радара с синтезированной апертурой в виде сборки из подвижной и неподвижной антенн. Дальнейшим развитием данного метода является выполнение интерферометрических измерений, позволяющих достичь разрешения на уровне нескольких миллиметров на дальности 50 м. Для достижения высокой точности измерений применялись такие продвинутое решения, как сложение полос спектра, моторизованное перемещение одного из приемников и контролируемое изменение задержки сигнала с помощью нагрева линии задержки на ПАВ. Здесь также в полной мере использовались рассмотренные ранее протоколы обмена данными и внешние программы на Octave и Python.

Основным содержанием пятой главы является обсуждение дизайна и реализации QPSK-модема. При этом подробно анализировались занимаемая полоса и спектральная эффективность сигнала QPSK, которые зависят от формы выбираемого импульса. И здесь заходит речь о формировании импульсов типа «приподнятый косинус» (RC) и «корень квадратный из приподнятого косинуса» (RRC). Большое внимание также уделяется вопросам синхронизации, в которой выделяются этапы «грубой» и «точной» синхронизации, при этом точная синхронизация выполняется с помощью фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), реализуемой в GNU Radio блоком Costas Loop (петля Костаса). В завершение главы приведена окончательная блок-схема QPSK-модема.

В шестой главе рассматриваются такие базовые концепции GNU Radio для синхронизации задач обработки, как теги (метки) и сообщения. Интерфейс передачи сообщений работает асинхронно по отношению к непрерывному потоку данных, позволяя взаимодействовать с блоками в любой точке блок-схемы. Эта возможность оказывается особенно полезной при работе со схемами пакетной связи. В отличие от этого, теги функционируют изолированно от потока данных, но доступны только из функции `general_work/work_block`. Они служат механизмом синхронизации с конкретными событиями в потоке данных.

В седьмой главе представлен подробный обзор системы DAB/DAB+, современного стандарта цифровой связи, в котором обобщены многолетние исследования в области кодирования звука и цифровой связи. Профиль HE-AACv2 достиг высокого уровня качества звука, обеспечивая передачу hi-fi при довольно низких скоростях передачи, в то время как COFDM может работать с каналами с временной и частотной селекцией с высоким уровнем надежности. Хотя многие из представленных концепций довольно сложны для понимания, их восприятие упрощается благодаря тому, что они были разработаны в цифровой среде. Действительно, можно легко найти программные реализации с открытым исходным кодом, которые помогают разобраться в сложной концепции с помощью ПК. В частности, это относится к передаче данных в формате DAB, где доступно несколько вариантов подключения передатчика и приемника.

Восьмая глава расширяет возможности пользовательской цифровой системы связи для декодирования всех уровней спутниковой системы связи, используя одну и ту же базовую схему модуляции. Поскольку спутник находится на низкой околоземной орбите (LEO), он ежедневно пролетает над любой областью мира, так что сигнал доступен для всех читателей, независимо от их географического положения. В то время как космическая связь выигрывает от идеальных условий распространения в открытом космосе, наземная связь страдает от многолучевых помех и замираний – проблема, которая рассматривается в восьмой главе с использованием мультиплексирования с ортогональным разделением частот (OFDM), реализованного в стандарте цифрового аудиовещания.

И наконец, в девятой главе рассказывается о том, как платформа GNU Radio с открытым исходным кодом может быть дополнена пользовательскими блоками обработки, написанными на Python или C++, с акцентом на пользовательские блоки исходного кода для добавления нового оборудования в цепочку обработки или новых приемников для реализации протоколов обработки либо декодирования, которые еще не поддерживаются стандартными блоками обработки GNU Radio.

Как видно из приведенного краткого содержания глав книги, в ней, помимо собственно SDR и GNU Radio, затрагивается широкий круг вопросов, касающихся стандартов связи, протоколов обмена данными и методов расчета характеристик радиосистем. Несмотря на то что предлагаемые и описанные программно-аппаратные комплексы не всегда могут быть реализованы

в полном объеме на доступной элементной базе, те решения, которые были положены в основу проектирования этих систем, могут, несомненно, расширить теоретический и практический багаж широкого круга специалистов.

Для заинтересованных читателей на сайте https://gitlab.xlim.fr/gnuradio_book/flowcharts приведены блок-схемы программ, включенных в книгу в виде рисунков, и листинги программ на Python или Octave. Много учебной информации по GNU Radio можно найти на сайте <https://www.gnuradio.org/>. Также несомненный интерес представляют труды ежегодной Американской конференции по GNU Radio, доступные на сайте <https://pubs.gnuradio.org>.

Сокращения

ACARS – aircraft communication addressing and reporting system (авиационная система адресации и передачи сообщений)

ADC – analog-to-digital converter (аналого-цифровой преобразователь)

AGC – automatic gain control (автоматическая регулировка усиления)

BPSK – binary phase shift keying $\varphi \in \{0, \pi\}$ (двоичная фазовая манипуляция)

CCSDS – consultative committee for space data systems (консультативный комитет по системам космических данных)

CDMA – code division multiple access used in particular for identifying which GPS satellite is broadcasting (множественный доступ с кодовым разделением, используемый, в частности, для идентификации спутника GPS, ведущего вещание)

CGRAN – comprehensive GNU Radio archive network at <https://cgran.org> (всеобъемлющая архивная сеть GNU Radio по адресу <https://cgran.org>)

COTS – commercial off the shelf (готовые к использованию продукты)

CRC – cyclic redundancy check (циклический избыточный код)

DAB – digital audio broadcasting (цифровое аудиовещание в формате DAB)

DAC – digital-to-analog converter (цифроаналоговый преобразователь)

FDMA – frequency division multiple access (множественный доступ с частотным разделением)

FFT – fast Fourier transform an $N \log_2(N)$ complexity implementation of the Fourier transform (быстрое преобразование Фурье с вычислительной сложностью $N \log_2(N)$)

FM – frequency modulation (частотная модуляция)

FSK – frequency-shift keying (FM digital modulation) (частотная манипуляция (цифровая частотная модуляция))

FSPL – free space propagation loss, the logarithmic expression of Friis energy conservation (потери при распространении в свободном пространстве, описываемые логарифмическим уравнением (формулой Фрииса))

GNU – GNU is not Unix (GNU – это не Unix)

GPS – global positioning system (глобальная система определения местоположения)

GRAVES – Grand Réseau Adapté à la VEille Spatiale is the French space surveillance RADAR emitting a continuous wave at 143.05 MHz (французский радар космического наблюдения, излучающий непрерывный сигнал на частоте 143,05 МГц)

IF – intermediate frequency (промежуточная частота)

IQ – in-phase/quadrature (синфазная/квадратурная)

ISI – inter-symbol interference (межсимвольная интерференция)

ISS – International Space Station whose amateur service is broadcasting on 145.8 MHz (Международная космическая станция, любительская служба которой ведет вещание на частоте 145,8 МГц)

LEO – low Earth orbit (низкая околоземная орбита)

LO – local oscillator (гетеродин)

LOS – line of sight (линия прямой видимости)

MEO – medium Earth orbit (средняя околоземная орбита)

NCO – numerically controlled oscillator (генератор с числовым управлением)

OFDM – orthogonal frequency division multiplexing (мультиплексирование с ортогональным разделением частот)

PDU – Protocol Data Unit (протокольный блок данных)

PMT – polymorphic types (полиморфные типы)

POCSAG – Post Office Code Standardisation Advisory Group pager protocol for emergency services (Консультативная группа по стандартизации почтовых кодов для пейджеров экстренных служб)

QPSK – quad phase shift keying $\varphi \in \{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2\}$ (квадратурная фазовая манипуляция со сдвигами фазы $\{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2\}$)

RADAR – radio detection and ranging (обнаружение цели и определение дальности с помощью радиосигнала)

RDS – radio data system (система передачи данных по радио)

RRC – root raised cosine (корень квадратный из приподнятого косинуса)

RF – radio frequency (радиочастота)

RTL-SDR – a set of low-cost SDR receivers based on a RF front end and the Realtek analog-to-digital converter to USB (набор недорогих SDR приемников, базирующихся на радиоинтерфейсе и микросхеме RTL2832U для согласования АЦП с USB)

SDR – software-defined radio (программно-определяемое радио)

SNR – signal-to-noise ratio (отношение сигнал–шум)

TED – timing error detector (детектор ошибок синхронизации)

WBFM – wideband frequency modulation the modulation scheme used by commercial FM broadcasters (широкополосная частотная модуляция – схема модуляции, используемая коммерческими FM-радиостанциями)

1

Начало работы с GNU Radio: модельные сигналы

В этой главе рассматриваются следующие темы:

- 1) общие принципы работы *программно-определяемого радио* (software-defined radio – SDR) и методы минимизации зависимости обработки от аппаратной компоненты, позволяющие реализовать все этапы цифровой обработки сигнала после аналого-цифрового преобразования;
- 2) обработка комплексных чисел в GNU Radio;
- 3) *графический интерфейс пользователя* (Graphical User Interface – GUI) в программе GNU Radio Companion.

При анализе данных тем в GNU Radio будет использоваться обработка модельных сигналов, так что для изучения этой главы не потребуется никакого оборудования. Все блок-схемы GNU Radio Companion, представленные в этой и последующих главах, доступны в репозитории GitHub на сайте gitlab.xlim.fr/gnuradio_book, а также в зеркале gitlab.com/gnuradio_book. При открытии этих блок-схем предполагается, что для улучшения работы с ними активированы пункты меню **View** ⇒ **Show parameter expressions in block** (Вид ⇒ Показать выражения для значения параметра в блоке) и **Show parameter value in block** (Показать значение параметра в блоке), а также **Show Block comments** (Показать комментарии блока).

1.1. Эволюция радиосистем в направлении SDR

Термин «программное радио» был введен Дж. Митолой (J. Mitola) в начале 1990-х годов [1]. Основная идея этой технологии заключается в том, чтобы ограничить аналоговую часть радиоприемника, расположенную рядом с антенной, ВЧ-усилителем и фильтрами, после чего использовать высокоскоростной аналого-цифровой преобразователь (АЦП) для преобразования сигнала основной полосы частот в цифровую форму. После этого все обычные операции (демодуляция, фильтрация и т. д.) выполняются в цифровом виде с помощью *цифрового сигнального процессора* (DSP). Это было бы идеальным решением для SDR, которое достижимо сегодня, хотя и остается довольно дорогим, таким, например, как радиосистема AMD-Xilinx Zynq Ultrascale+

RFSoc с *программируемым пользователем вентиляемыми матрицами* (FPGA) [2]. В этом случае доступны АЦП с частотой 5,9 Гвыб/с и цифроаналоговые преобразователи (ЦАП) с частотой 10 Гвыб/с, позволяющие напрямую производить оцифровку сигналов с несущей частотой примерно до 3 ГГц.

Общеизвестно, что в системах связи для передачи информации из одной точки в другую используется *несущая частота*. Данная частота сама по себе не передает информацию и, следовательно, может быть удалена на приемной стороне. Это достигается путем умножения сигнала, полученного от антенны, на локальную копию несущей. Таким образом, в результате указанного процесса получается спектр *основной полосы частот* с центром около 0 Гц, содержащий передаваемую информацию. В недавнем прошлом такие операции выполнялись с использованием аналоговых электронных компонентов. Концепция современных SDR заключается в выполнении всех функций демодуляции и декодирования в цифровом виде. Чтобы получить полное представление об аппаратных средствах SDR, которые будут использоваться в главе 2 (например, Adalm-Pluto и RTL-SDR), важно понять фундаментальные принципы, лежащие в основе современных архитектур SDR, особенно тех, которые построены на основе структуры с *нулевой промежуточной частотой* (zero-IF или ZIF).

Давайте сосредоточимся на приемной стороне. Общеизвестно, что в аналоговых приемниках наиболее часто используется супергетеродинная структура. Следовательно, для достижения эффективного приема различных каналов каскад демодуляции работает на фиксированной *промежуточной частоте* (ПЧ), обычно составляющей 10,7 МГц для диапазона вещания с *частотной модуляцией* (FM). Все электронные компоненты этого каскада (усилители, фильтры и т. д.) оптимизированы для данной фиксированной ПЧ. Преобразование частоты сигнала, поступающего от антенны (например, 88–108 МГц для FM-вещания), осуществляется смесителем и схемой перестраиваемого гетеродина. В случае SDR наличие ПЧ нежелательно, поскольку наша цель – обрабатывать только сигнал основной полосы частот. Таким образом, архитектура прямого преобразования, или ZIF, – это то, что нам нужно. Хотя эта структура известна уже довольно давно, только в 1990-х годах, с развитием интегральной электроники, она стала жизнеспособным вариантом. Давайте теперь проиллюстрируем эту эволюцию на примере двух различных аппаратных платформ SDR, которые мы будем использовать в главе 2.

Первая из них, структура которой показана на рис. 1.1, представляет собой приемник RTL-SDR, изначально предназначенный для приема сигнала цифрового телевидения. Он использует так называемую структуру со второй нулевой ПЧ и аналоговый интерфейс, который переносит радиосигнал на промежуточную частоту, заданную пользователем. Затем этот ПЧ-сигнал дискретизируется 8-разрядным АЦП, работающим на частоте 28,8 МГц. Интересно, что за АЦП следует двухканальная структура, которая называется *IQ-демодулятором* (I – синфазный, Q – квадратурный). Структура IQ является базовой схемой, встречающейся в любой системе SDR, и мы вскоре вернемся к ней.

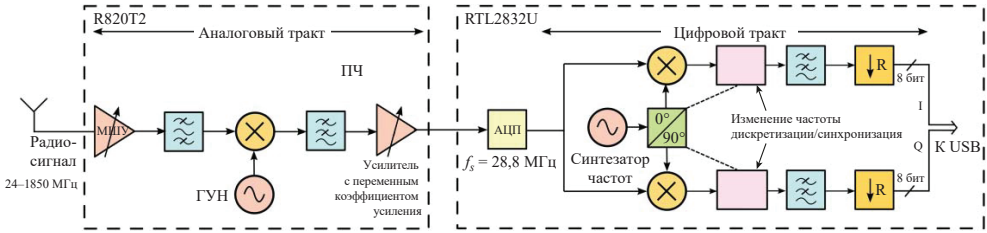


Рис. 1.1 Структурная схема приемника RTL-SDR, состоящего из двух основных микросхем: R820T2 и RTL2832U

Вторым примером аппаратной реализации SDR является Adalm-Pluto от Analog Devices Inc. (ADI) [3] (рис. 1.2). В него встроен радиочип, который представляет собой законченный приемопередатчик 2x2 (AD9363, рис. 1.3), работающий на несущих частотах от 325 МГц до 3,8 ГГц с мгновенной полосой пропускания 56 МГц.

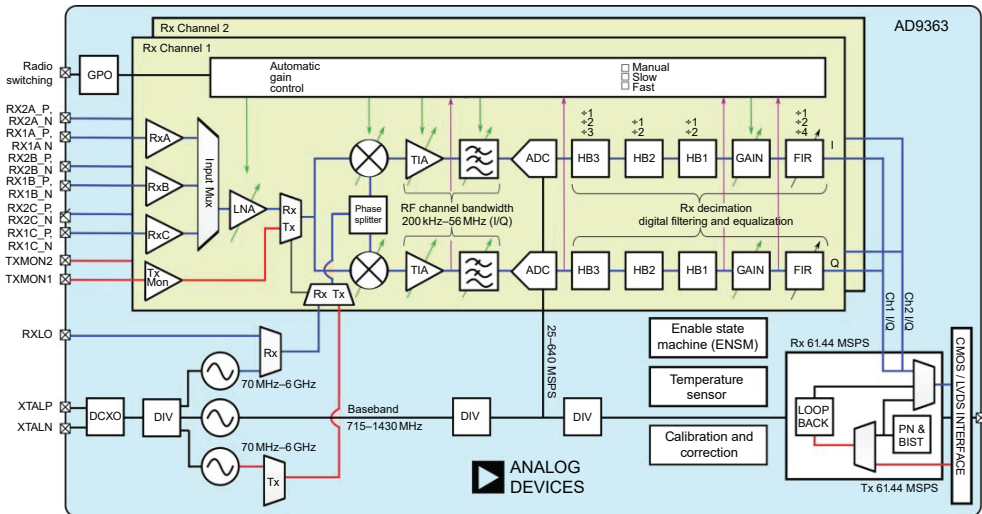


Рис. 1.2 Секция радиоприемника AD9363. Этот чип встроен в устройство Adalm-Pluto

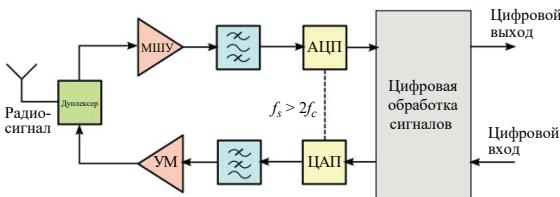


Рис. 1.3 Современная программно-определяемая радиостанция

Это полноценный приемопередатчик ZIF и одна из первых эффективных реализаций данной, казалось бы, простой структуры. Для полноты карти-

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru