

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ РАДИОПРИЕМНИКОВ С ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКОЙ СИГНАЛА

ОМАР ГАСАНОВ, к.т.н., инженер, ОАО НИИ «Сапфир», ст. преподаватель, ДГТУ
АЛЕКСАНДР ГУБА, к.т.н., зав. кафедрой электроники и микропроцессорной техники, ДГТУ
РАСУЛ КИШОВ, студент 5 курса, ДГТУ

В статье рассматриваются принципы разработки цифровых радиоприемных устройств, аппаратные и программные средства для их проектирования и вопросы применения различных видов цифровых фильтров в радиоприемных устройствах.

В статье «Активные фильтры в приемных устройствах радиовещательного диапазона», опубликованной в ЭК №10, 2010, рассматривались различные варианты построения преселекторов радиоприемных устройств, среди которых схемы с использованием кварцевых фильтров, одно- и многоконтурных индукционных фильтров. Основное внимание было уделено применению активных безындукционных фильтров на основе высокочастотных операционных усилителей.

Анализ, проведенный при проектировании и изготовлении полосового эллиптического фильтра 9-го порядка показал, что проектирование активных фильтров с применением современных программных средств (в примере использовалась программа Filter Solutions 2006) занимает минимум времени и предполагает только точные требования к спецификации фильтра, после чего программное обеспечение производит все необходимые расчеты и формирует соответствующую схему. Однако дальнейшая реализация полученной схемы и тестирование выявили ряд недостатков, которые могут распространяться и на другие виды аналоговых фильтров.

В частности, номиналы элементов, используемые для получения требуемой характеристики, часто не входят в стандартные ряды сопротивлений и емкостей. Использование ближайших стандартных значений может привести к искажению характеристик фильтра, а комбинирование нескольких элементов или использование подстроечных вызывает увеличение массогабаритных характеристик и дополнительные сложности с подстройкой многоконтурной схемы. Кроме того, схемы, в которых используются элементы с малыми номиналами, более подвержены влиянию паразитных емкостей, сопротивлений и индуктивностей, что осложняет синтез фильтров высокого порядка, вызывает трудности в согласовании каскадов, подборе элементов и т.д.

В итоге можно отметить, что активные фильтры действительно могут применяться в качестве преселекторов в радиоприемных устройствах, однако их синтез и настройка требуют много времени, определенных практических и теоретических навыков как в схемотехнике, так и в проектировании топологии печатной платы, что затрудняет получение качественного, дешевого и простого в регулировке активного фильтра.

С развитием цифровых технологий все большее внимание уделяется построению радиоприемных трактов с применением цифровой обработки сигналов (ЦОС), называемых в литературе SDR — software defined radio. Эта технология основывается на возможности оцифровки радиосигнала в реальном времени и последующей обработке программными или аппаратными цифровыми средствами — цифровыми сигнальными процессорами, ПЛИС и т.д. Технология SDR позволяет осуществлять прием и демодуляцию сигналов, в которых используются цифровые виды модуляции, такие как DPSK, QAM, GMSK и т.д. В зависимости от частоты и ширины спектра принимаемого сигнала цифровая обработка в приемнике может использоваться как по радиочастоте (см. рис. 1), так и после переноса сигнала на фиксированную промежуточную частоту — обработка по ПЧ (см. рис. 2).

Радиоприемники с цифровой обработкой сигнала по ПЧ относятся к супергетеродинному типу и имеют ряд преимуществ перед приемниками прямого преобразования — возможность работы в большом диапазоне частот, хорошая селективность и чувствительность во всем диапазоне [1]. Приемники такого типа используются в профессио-

нальной связанной аппаратуре, к которой предъявляются жесткие технические требования. В числе недостатков супергетеродинных приемников — относительно высокое энергопотребление и большие размеры из-за использования аналоговых элементов.

К преимуществам приемников прямого преобразования относятся малое энергопотребление и возможность размещения всех элементов в небольшом портативном устройстве (в идеале в корпусе одной микросхемы), однако по избирательности, чувствительности и динамическому диапазону эти устройства уступают супергетеродинным приемникам.

При обработке сигналов с частотами, не превышающими несколько десятков МГц, скорость современных АЦП (для АЦП последовательного приближения она составляет несколько сотен Мвыб/с при разрядности до 12 бит) позволяет использовать классический принцип дискретизации в соответствии с теоремой Котельникова, согласно которой частота выборки должна быть как минимум в два раза больше верхней частоты в спектре дискретизируемого сигнала. При этом оцифровке подвергается диапазон частот от постоянной составляющей до половины частоты дискретизации, и на входе АЦП достаточно использовать аналоговый ФНЧ для защиты от наложения спектров. Для высокочастотных сигналов используется полосовая дискретизация (under sampling), которая позволяет обойти ограничение, накладываемое теоремой Котельникова для обработки узкополосных сигналов, у которых ширина спектра много меньше абсолютного значения центральной частоты. Этому условию соответствуют практически все

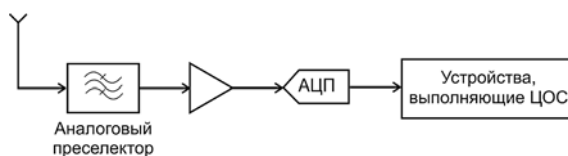


Рис. 1. Структура приемника с ЦОС по радиочастоте

радиосигналы. В этом случае теорема Котельникова звучит следующим образом: для сохранения информации о сигнале частота его дискретизации должна быть равной или большей, чем удвоенная ширина его полосы [4]. Математически условие, которое должна выполнять частота дискретизации, описывается выражением (1) [5]:

$$(2f_c - B)/m \geq f_s \geq (2f_c + B)/m + 1 \quad (1)$$

где: f_c — центральная частота в спектре сигнала; f_s — частота дискретизации; B — ширина спектра сигнала; m — произвольное целое число, выбираемое таким образом, чтобы выполнялось соотношение $f_s \geq 2B$.

При полосовой дискретизации оцифровке подвергается не вся полоса частот, а лишь небольшая ее часть. При этом для защиты от наложения спектра необходимо использовать полосовые аналоговые фильтры. Стоит также отметить, что полосовая дискретизация позволяет одновременно с оцифровкой сигнала произвести перенос его спектра на низкую частоту.

В обоих случаях на входе преобразователя необходимо использовать аналоговые фильтры для защиты от наложения спектра. При этом, чем выше частота дискретизации, тем менее жесткие требования предъявляются к аналоговому фильтру. На практи-

ке разработчики стараются обеспечить такую частоту дискретизации, чтобы на входе АЦП было достаточно использовать трех- или четырехкаскадный пассивный фильтр. Для рассматриваемого в предыдущей статье диапазона частот (до 25 МГц) можно применить как схему с непосредственной дискретизацией сигнала по Котельникову, так и полосовую дискретизацию.

Цифровые устройства в радиоприемнике решают следующие задачи: выделение требуемого канала, перенос спектра сигнала на низкую частоту и декодирование содержащихся в сигнале данных или детектирование. Для решения этих задач могут применяться различные устройства и их сочетания. Первичную, неинтеллектуальную обработку, включающую канальную фильтрацию, гетеродинирование, понижение частоты дискретизации (децимацию), чаще всего выполняют либо при помощи быстродействующей программируемой логики (FPGA), либо в специализированных микросхемах — цифровых приемниках (digital down converter — DDC).

В качестве примера подобных микросхем можно привести AD6620 компании ADI и 1288XK1T производства ФГУП НПЦ «Элвис», структура которой изображена на рисунке 3. Подробно возможности данного устройства описаны в [2], отметим лишь некоторые из них:

- наличие 4-х независимых каналов для обработки 16-разрядных сигналов;
- скорость входного потока данных до 100 МГц в каждом канале;
- совместимость со многими типами АЦП;
- возможность гибкой настройки внутренней структуры микросхемы для обработки как действительных, так и комплексных сигналов.

Микросхема содержит CIC-фильтры для понижения частоты дискретизации, по два КИХ-фильтра 64 порядка в каждом канале, цифровые гетеродины для получения квадратурных сигналов и удобный выходной интерфейс для чтения данных. Коэффициенты фильтров, коэффициенты децимации каждого каскада, маршрутизация данных внутри чипа и многие другие параметры задаются программно. Все это делает микросхему 1288XK1T и ее аналоги удобными для применения в самых разных системах цифрового приема. Для окончательной обработки сигнала, декодирования данных, обработки декодированного битового потока и реализации протоколов более высокого уровня применяются цифровые сигнальные процессоры.

После дискретизации задача выделения требуемого канала решается при помощи цифровых фильтров, которые представляют собой набор постоянных чисел — коэффициентов фильтра, количество и значения которых определяют его вид и крутизну характеристики. Различают два основных класса цифровых фильтров — нерекурсивные (КИХ-фильтры) и рекурсивные (БИХ-фильтры). КИХ-фильтры имеют известные преимущества перед рекурсивными, которые заключаются в их устойчивости, меньшей подверженности эффектам квантования и возможности получения



Рис. 2. Структура приемника с ЦОС по промежуточной частоте

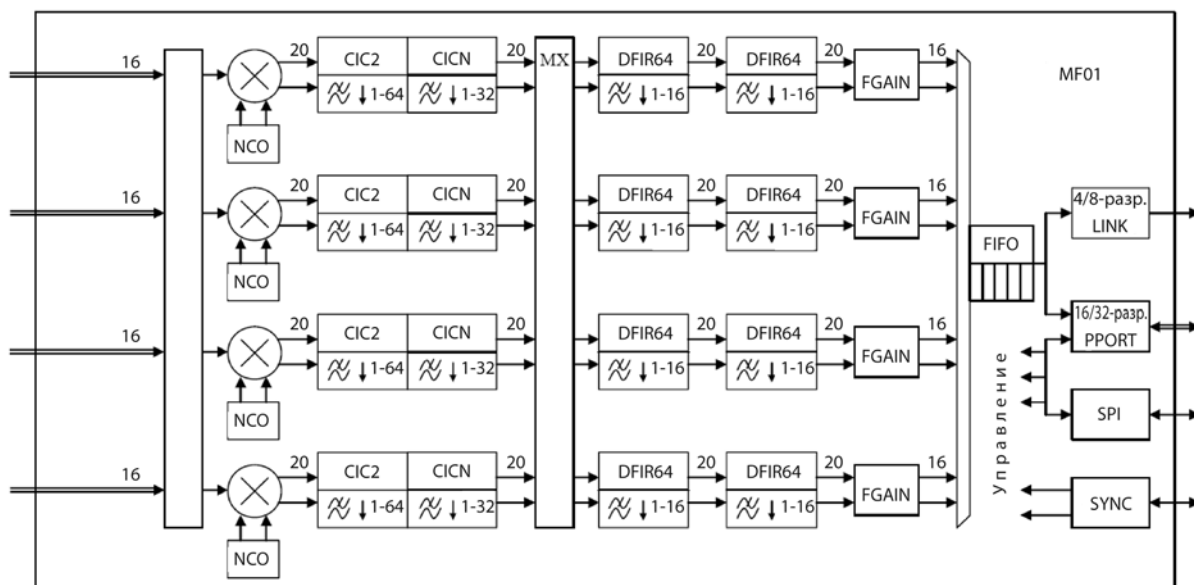
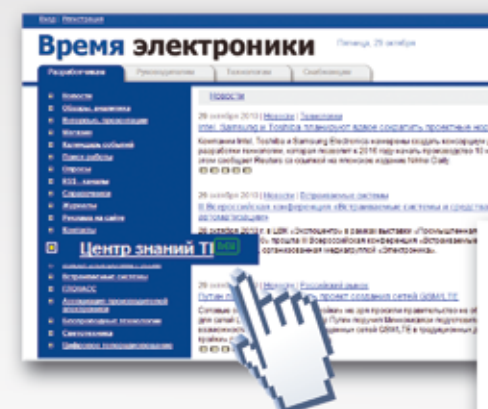


Рис. 3. Структура цифрового приемника 1288XK1T

Центр знаний TI на портале «Время электроники»



Центр знаний TI «Электропитание процессоров» предлагает инженерам-разработчикам доступ к исходным проектам, руководствам по выбору компонентов, статьям и каталогам, которые дадут вам ценную информацию по компонентам TI для управления питанием процессоров. Заходите регулярно – информация постоянно обновляется.

- ▶ Видео
- ▶ Исходные проекты (более 14)
- ▶ Полезные ссылки
- ▶ Форум

Свяжитесь с нами через сайт: <http://www.russianelectronics.ru/ti-power-for-processors/>

линейной фазовой характеристики, что особенно важно в системах связи. В этой связи в цифровых радиоприемных устройствах более широкое распространение получили именно нерекурсивные фильтры.

Для проектирования цифровых фильтров, также как и для разработки аналоговых активных и пассивных фильтров, применяются разнообразные программные средства. Для расчета коэффициентов фильтра от разработчика требуется только определение требований к фильтру, но не знание алгоритмов и методов расчета коэффициентов. Широкое распространение для проектирования дискретных фильтров получил пакет Matlab, т.к. он позволяет провести расчет фильтра различными методами, с применением разных окон и т.д. Кроме того, для расчета коэффициентов фильтра можно использовать, как режим командной строки, так и графический интерфейс приложения Filter design and analysis tool (FDA Tool).

После расчета, как правило, коэффициенты фильтра сохраняются в файле необходимого формата для дальнейшего использования в соответствующей программе, однако в возможности пакета Matlab входит также моделирование работы фильтра в цифровой системе при помощи приложения Simulink и загрузка в поддерживаемые отладочные комплекты.

По сравнению с аналоговыми цифровые фильтры имеют следующие преимущества [3]:

- возможность получения недоступных для аналоговых фильтров характеристик (как крутизны АЧХ, так и линейности ФЧХ). Увеличение порядка цифрового фильтра приводит лишь к увеличению количества математических операций, так что порядок фильтра ограничен только быстродействием цифровой системы;
- цифровые фильтры не подвержены влиянию старения и температурного дрейфа параметров;
- т.к. цифровой фильтр представляет собой набор чисел — коэффициентов, то для изменения характеристики достаточно изменить набор коэффициентов, что делает возможным создание адаптивных фильтров;
- цифровые фильтры могут работать как с низкочастотными, так и с высокочастотными сигналами.

Подводя итоги, хочется отметить, что появление радиоприемных устройств с цифровой обработкой сигналов стало логичным продолжением развития цифровой техники. Использование цифровой обработки сигналов позволило разрабатывать системы высокоскоростного обмена данными по радиоканалам с применением цифровых методов модуляции радиосигнала. В зависимости от стадии приема, на которой используется цифровая обработка, возможно получение

как недорогих, компактных и мало потребляющих устройств вплоть до систем на кристалле, так и изделий, отвечающих жестким требованиям по избирательности, динамическому диапазону, чувствительности и другим параметрам, что достигается правильным сочетанием аналоговой и цифровой частей приемного тракта. Наиболее вероятно, что в перспективе развитие «цифрового» приема будет идти по пути увеличения скоростей дискретизации и обработки, что позволит охватить все более широкий диапазон частот, и при этом будет уменьшаться доля аналоговой схемотехники в структуре приемника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. Пер с англ. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2003.
2. Техническое описание СБИС четырехканального цифрового приемника 1288XK1T (www.MultiCore.ru).
3. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е издание. Пер с англ. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2004.
4. Аналого-цифровое преобразование. Под ред. У. Кестера. Пер с англ. под ред. Е.Б. Володина. — М.: Техносфера, 2007.
5. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов: 2-е изд. Пер с англ. — М.: ООО «Бином-Пресс», 2006.