

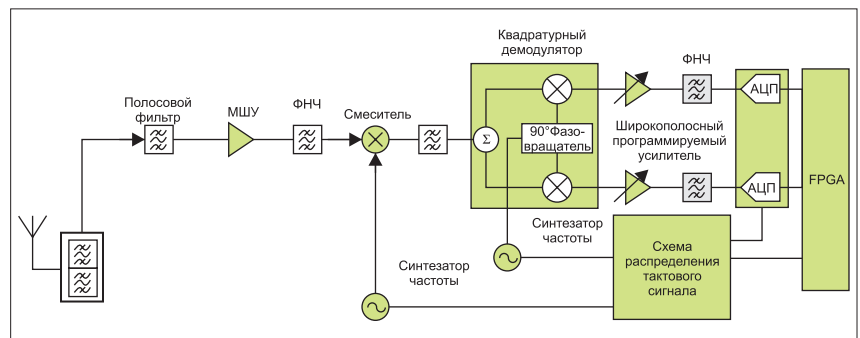
СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПРИЕМНИКОВ СВЯЗНОЙ РАДИОАППАРАТУРЫ

Реализация схем современных радиоприемных устройств для различных приложений зачастую вызывает необходимость поиска новых решений. Это связано со все возрастающими требованиями, предъявляемыми к средствам и системам радиосвязи различного назначения. Одним из главных требований является возможность работы в более широком диапазоне радиоволн, с сигналами с различной шириной спектра и видами модуляции (манипуляции). Также требуется большой динамический диапазон и хорошая избирательность приемника.

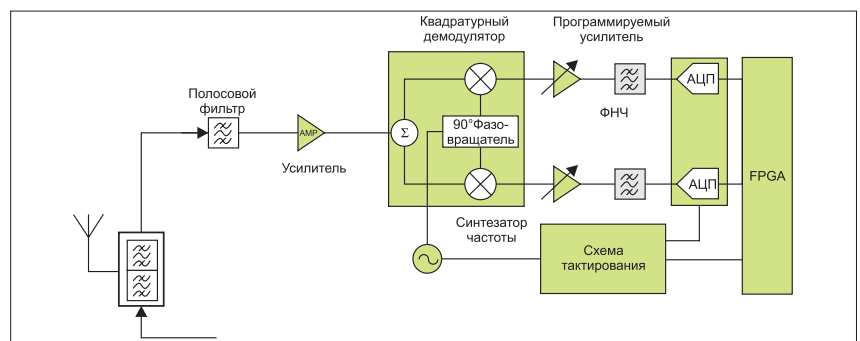
До недавнего времени подавляющее большинство схем приемников связных устройств создавалось по супергетеродинной схеме. Схема супергетеродинного приемника с квадратурным преобразованием сигнала приведена на рис. 1. Ее достоинствами являются большой динамический диапазон и прекрасная избирательность. К недостаткам данной схемы относятся большое количество компонентов, значительное энергопотребление, невозможность работы с сигналами с различными параметрами.

Одним из самых предпочтительных вариантов уменьшения размеров конструкции приемника или передаточного устройства в целом является увеличение количества реализованных цифровых функций на единицу площади кристалла. Достичь сравнительной степени интеграции аналоговых функций (компонентов) при современном уровне технологии производства полупроводников не представляется возможным. В данном случае схема содержит каскад усиления и фильтрации радиочастоты, смеситель, схему усиления, фильтрации и согласования сигнала основной частоты и аналого-цифровой преобразователь (для каждого из каналов).

В настоящее время современный аналого-цифровой преобразователь выполнен по КМОП-технологии, вследствие чего он стоит недорого и имеет малое энергопотребление. Современные



▲ Рис. 1. Супергетеродинный приемник с квадратурным преобразованием сигнала



▲ Рис. 2. Приемник с преобразованием сигнала на промежуточной частоте

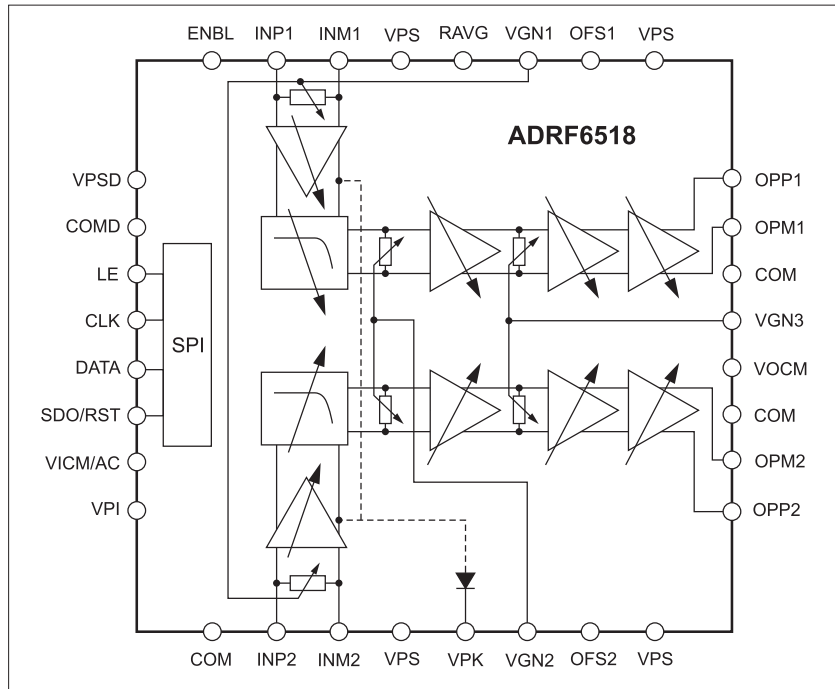
АЦП достигли скорости преобразования в несколько гигагерц, если же рассматривать микросхемы с приемлемой для массовых коммерческих и военных приложений стоимостью, то можно говорить о преобразователях со скоростью работы до 250 MSPS и разрядностью до 16 бит.

Сложность заключается в том, чтобы интегрировать фильтр (как правило,

в подобных схемах применяются фильтры на ПАВ), усилители и смеситель, причем сделать это, чрезмерно не увеличивая габариты кристалла, энергопотребление и коммерческую стоимость. Отказаться от полосового фильтра на ПАВ (и от фильтра подавления зеркального канала) можно, изменив архитектуру приемника. Схема, называемая

схемой с преобразованием на нулевую промежуточную частоту (или схема прямого преобразования), приведена на рис. 2. В данной схеме сигнал преобразуется непосредственно в область основной частоты (с разложением на квадратурные составляющие), при этом необходимость в фильтре и усилителе промежуточной частоты отпадает. Параметры избирательности схемы определяются характеристиками фильтров нижней частоты, следующих за смесителями. В отличие от фильтров на ПАВ, данные фильтры нижних частот можно сделать перестраиваемыми, с изменяемой частотой среза и крутизной характеристики. Отметим, что данные фильтры могут быть интегрированными в микросхему усилителя. В данном случае стоит упомянуть серию ADRF651x производства Analog Devices Inc. [1]. Наиболее значительными характеристиками обладает ADRF6518, который представляет собой согласованную пару полностью дифференциальных, обладающих малым шумом и низкими искажениями усилителей с переменным коэффициентом усиления и программируемых фильтров. Структура микросхемы представлена на рис. 3. Оба канала усилителей и фильтров подавляют сильные внеполосные помехи, усиливая полезный сигнал в требуемой полосе частот, что позволяет смягчить требования к ширине полосы и динамическому диапазону аналого-цифровых преобразователей.

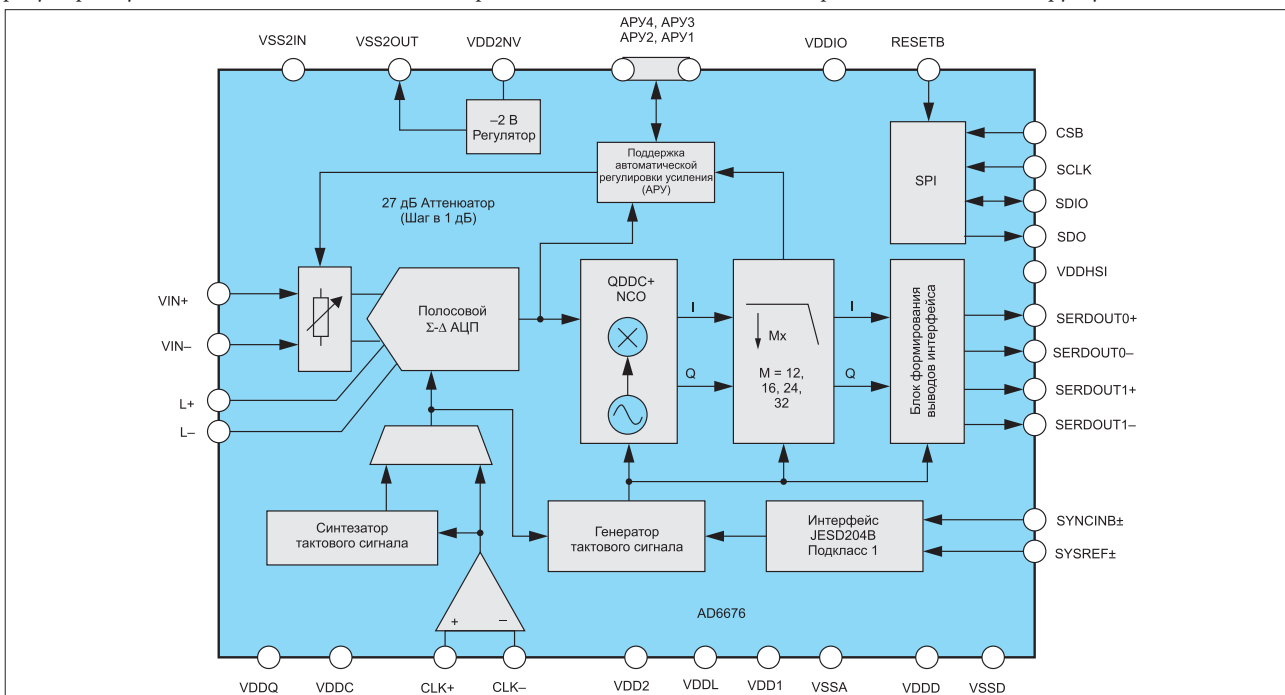
Усилители с переменным коэффициентом усиления, предшествующие фильтрам, обеспечивают непрерывную регулировку в диапазоне 24 дБ с воз-



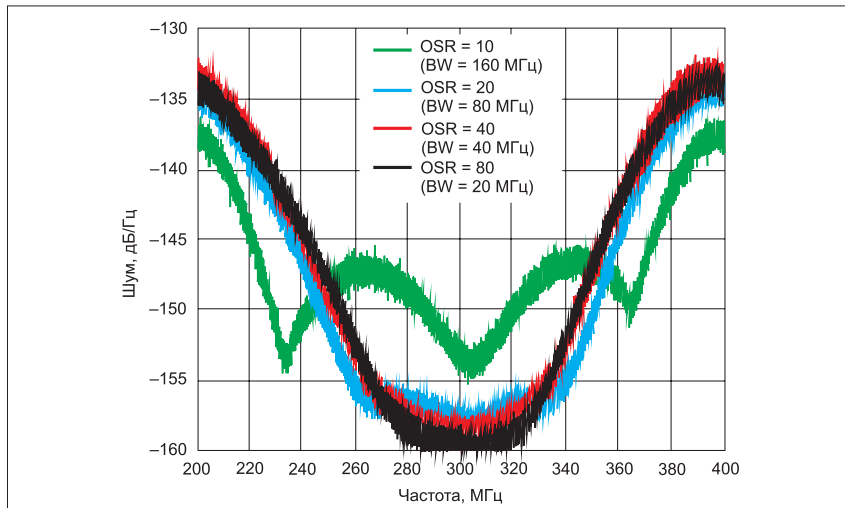
▲ Рис. 3. Внутренняя структура программируемого усилителя со встроенными фильтрами ADRF6518

можностью установки фиксированного коэффициента усиления 9, 12 или 15 дБ. Фильтры имеют шестиполосную характеристику Баттлерворта с частотой среза по уровню 0,5 дБ, изменяемой в диапазоне 1–63 МГц с шагом 1 МГц. При необходимости работы в полосе более 63 МГц фильтры можно полностью исключить из сигнальной цепочки; при этом ширина полосы по уровню –3 дБ расширяется до 1100 МГц. Уровень пикового сигнала на входах фильтров может контролироваться при помощи широкополосного пикового детектора.

Усилители с переменным коэффициентом усиления, которые следуют за фильтрами, обеспечивают непрерывную регулировку в диапазоне 24 дБ с возможностью установки фиксированного коэффициента усиления 12, 15, 18 или 21 дБ. Выходные буферы дают дополнительный коэффициент усиления 3 или 9 дБ, обеспечивают дифференциальный выходной импеданс менее 10 Ом и способны поддерживать уровень гармонических искажений третьего порядка (HD3) более 65 дБн при выдаче сигнала с размахом 1,5 В в нагрузку 400 Ом.



▲ Рис. 4. Внутренняя структура приемника промежуточной частоты AD6676



▲ Рис. 5. Спектральная плотность шума AD6676 при различных значениях ширины полосы и коэффициентах передискретизации

Применение перестраиваемых фильтров позволяет использовать одну и ту же схему в различных приложениях, отличающихся в том числе шириной спектра и видом модулированного сигнала. Важно отметить, что приемники подобной схемы имеют очень широкий диапазон рабочих частот. Радиотрансиверы, реализованные по схеме с преобразованием на нулевую комплексную промежуточную частоту, могут работать в диапазоне от нескольких десятков мегагерц до 6 и более гигагерц, причем достигается это изменением частоты гетеродина.

Подобная схема, при условии использования в ней высокопроизводительного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), дает возможность создавать

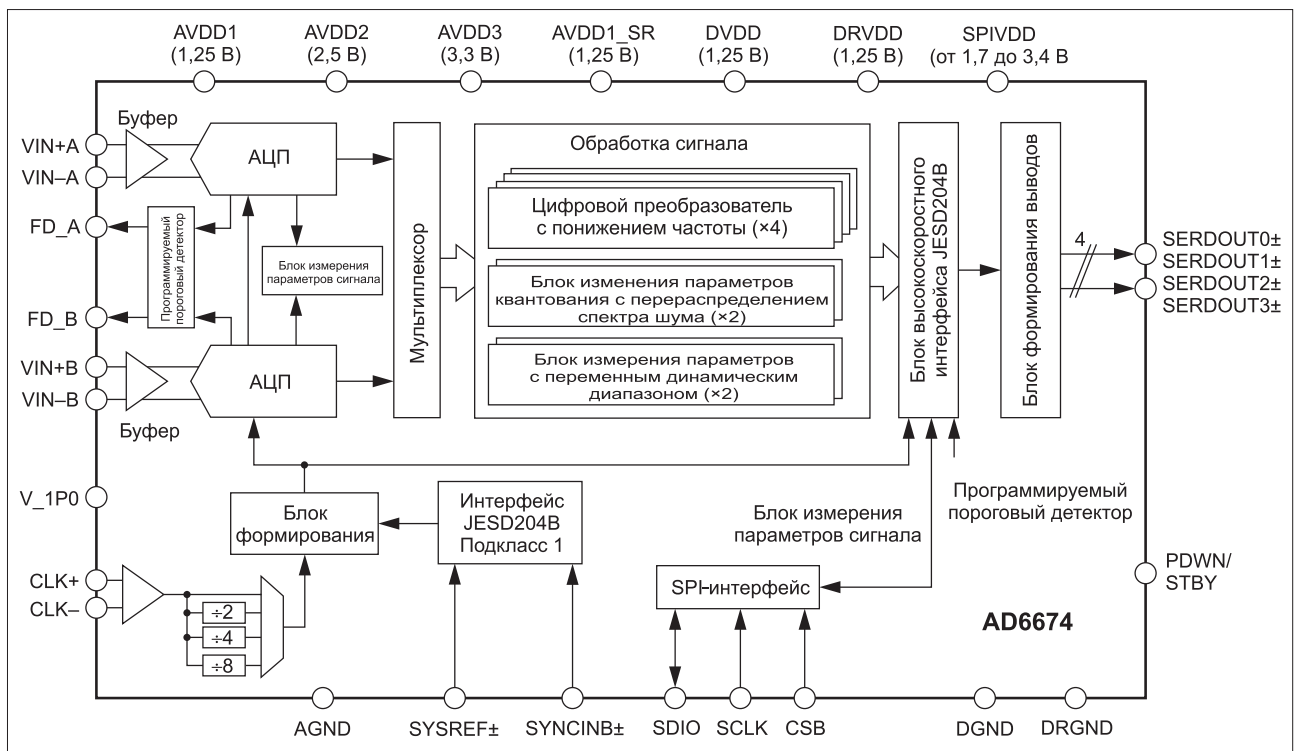
устройства, работающие в широком диапазоне частот с сигналами с различной шириной спектра (или канала), причем настройка системы будет осуществляться программным способом. Говоря иными словами, речь идет о программно-определяемой радиосистеме (еще употребляется термин программно-конфигурируемое радио), изменение рабочих параметров которой не требует изменения характеристик аналоговых (внешних усилителей, фильтров) компонентов. Особенностью программно-определяемых радиосистем является дискретизация сигнала на радиочастоте либо на промежуточной частоте.

В качестве примера рассмотрим микросхему AD6674 (рис. 4) [2], кото-

рая является интегрированной схемой приемника, осуществляющего аналого-цифровое преобразование сигналов с полосой 20–160 МГц, центрированных относительно ПЧ в диапазоне 70–450 МГц. Микросхема AD6676 подключается к радиочастотному усилителю или смесителю, преобразующему сигнал радиочастоты в сигнал промежуточной частоты.

Ядром микросхемы является перестраиваемый полосовой Σ - Δ АЦП с высоким коэффициентом избыточной дискретизации, что позволяет достигнуть больших значений коэффициента подавления соседнего канала, что, в свою очередь, избавляет от необходимости применения внешних фильтров, несмотря на то, что данная схема является схемой дискретизации на промежуточной частоте. Кроме того, данная структура увеличивает динамический диапазон приемника, благодаря чему уменьшается количество усилительных каскадов. Отметим, что динамический диапазон AD6676 позволяет производить дискретизацию сигнала во второй зоне Найквиста.

Особенность сигма-дельта архитектуры с полосовой фильтрацией АЦП AD6676 позволяет осуществлять изменение ширины полосы пропускания. Это, а также способность менять частоту дискретизации, дает возможность настройки значения спектральной плотности шума. Увеличив коэффициент передискретизации (увеличив частоту дискретизации) и уменьшив полосу пропускания, можно уменьшить спектральную плотность



▲ Рис. 6. Внутренняя структура широкополосного приемника AD6674

шума (примеры приведены на рис. 5). Центральная частота сигнала промежуточной частоты, ширина полосы сигнала и частота дискретизации в AD6676 задаются программно.

Интегрированный квадратурный цифровой преобразователь с понижением частоты (QDDC) с последующими выбираемыми фильтрами прореживания уменьшает требуемую частоту дискретизации комплексных 16-разрядных данных до значений в диапазоне 62,5–266,7 MSPS. Квадратурные выходные данные передаются через интерфейс JESD204B, поддерживающий конфигурацию с одной или двумя линиями данных и быстродействие до 5,333 Гбит/с

АЦП работает с тактовой частотой в диапазоне 2,0–3,2 ГГц, обеспечивая исключительный динамический диапазон, предотвращая возникновение спектральных наложений и поддерживая неравномерность в полосе пропускания в пределах 1 дБ при пиковом выбросе вне полосы до 0,5 дБ. Передающая функция сигма-дельта модулятора АЦП определяет частотную характеристику аналогового входа. Традиционные высокоскоростные конвейерные АЦП обладают частотной характеристикой, аналогичной фильтру нижних частот, параметры которого задаются свойствами усилителя выборки и хранения и входного буфера. В AD6676 используется перестраиваемый полосовой фильтр 6-го порядка. Интегрированный цифровой пиковый детектор позволяет контролировать уровень мгновенной мощности сигнала. Блок АРУ включает в себя шаговый attenuator с диапазоном 27 дБ и шагом регулировки 1 дБ.

Сигнал тактовой частоты приемника может формироваться при помощи внутреннего умножителя частоты на схеме ФАПЧ или поступать от внешнего источника дифференциального тактового сигнала ВЧ. Конфигурирование внутренних параметров устройства под требования различных приложений осуществляется через совместимый с SPI интерфейс.

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

Одна из основных причин, почему стало технически возможным и экономически оправданным широкое применение концепции программно-конфигурируемого радио, — реализация цифровой обработки сигналов на высокопроизводительных ПЛИС (в общем случае) или ASIC (при массовом производстве серийного изделия, когда целесообразны затраты на разработку специализированного кристалла). Как правило, ASIC более предпочтительны с точки зрения энергопотребления и производительности. Микросхемы программируемой логики обладают такими преимуществами, как распространенность и возможность многократного программирования.

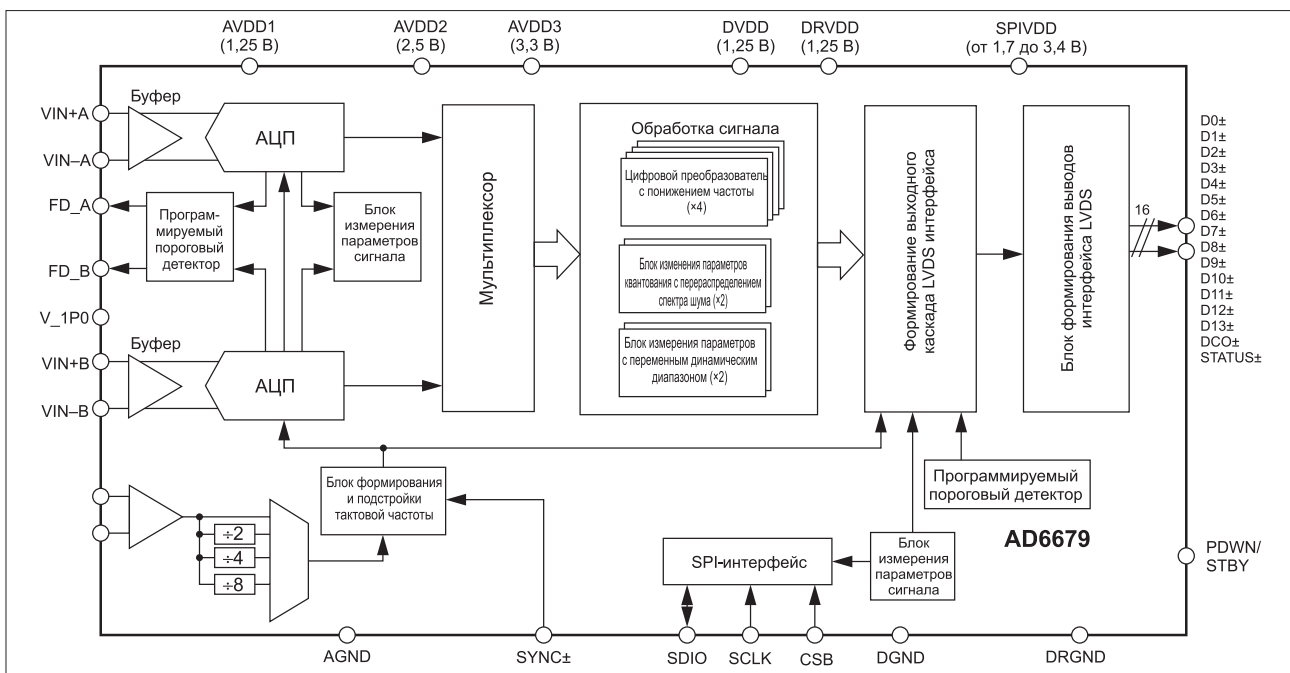
Другой причиной, сделавшей возможной реализацию радиоприемных устройств с прекрасными техническими параметрами и при этом обладающих малыми габаритами и скромным энергопотреблением, стала способность современных высокоскоростных АЦП выполнять функции цифровой обработки оцифрованного сигнала. Это уменьшает нагрузку на процессор (или ПЛИС) и упрощает процесс разработки.

Ранее в схемах приемников применялось преобразование частоты вниз с помощью аналоговых смесителей и цифровых преобразователей частоты с понижением, чтобы последовательно привести сигнал к области основной частоты (baseband) для последующей обработки. В настоящее время получает распространение иное решение — оцифровка сигнала в области высоких частот аналого-цифровыми преобразователями со скоростью выборки в несколько сотен миллионов в секунду и более, с последующим преобразованием сигнала с помощью встроенных цифровых преобразователей с понижением частоты.

Примером такого решения может быть приемник промежуточной частоты AD6674 (рис. 6) [3]. Данное решение является интегрированной схемой приемника, обеспечивающей оцифровку сигналов с шириной спектра до 385 МГц. Приемник AD6674 имеет в основе два 14-разрядных конвейерных аналого-цифровых преобразователя, осуществляющих преобразование сигналов со скоростью до 1 GSPS (микросхема выпускается в трех вариантах, различающихся скоростью работы — 500, 750 и 1 GSPS соответственно.)

Для последующей цифровой обработки сигнала используются четыре широкополосных цифровых преобразователя с понижением частоты (DDC), блок изменения параметров квантования с перераспределением спектра шума (NSR) и блок измерения параметров с переменным динамическим диапазоном (VDR).

Цифровые выходы АЦП соединены с четырьмя преобразователями частоты



▲ Рис. 7. Внутренняя структура широкополосного приемника AD6679

(DDC) через перекрестный мультиплексор. Блок изменения параметров квантования с перераспределением спектра шума (NSR) повышает отношение сигнал–шум в ограниченной полосе частот внутри полосы Найквиста. Кроме того, к выходу каждого АЦП подключен блок VDR, который позволяет получить максимальный динамический диапазон для заданного типа входных сигналов. Компонент также включает в себя несколько блоков, упрощающих реализацию функции АРУ в приемниках систем связи: программируемый пороговый детектор, который следит за уровнем мощности поступающего сигнала, и блок измерения параметров сигнала, который обеспечивает дополнительную информацию об оцифровываемом сигнале. Вывод данных осуществляется через последовательный высокоскоростной интерфейс JESD204B, который может быть сконфигурирован для работы с двумя или четырьмя линиями данных.

Концепция использования высокоскоростных АЦП для преобразования сигнала с последующим прореживанием заключается в применении более простых в реализации входных аналоговых цепей и использовании цифровых блоков АЦП для выполнения множества функций обработки сигнала.

Цифровой преобразователь с понижением частоты (DDC, digital downconverter) выполняет задачи преобразования частоты вниз, фильтрации и прореживания выходных данных с целью уменьшить нагрузку на ПЛИС или ASIC. Данные операции могут выполняться как с комплексными, так и с действительными сигналами. В общем случае это происходит следующим образом: схема на основе генератора с числовым управлением осуществляет выделение сигнала и переносит его в область нулевой частоты. Затем происходит фильтрация сигнала, позволяющая удалить нежелательные спектральные составляющие и прореживание выходных данных.

Таким образом, современные АЦП, несмотря на существенно большую скорость выборки по сравнению с АЦП предыдущего поколения, могут иметь сопоставимую или даже меньшую скорость вывода данных, что позволяет использовать доступные микросхемы цифровой обработки сигналов.

Также следует упомянуть еще одну микросхему, предназначенную для построения широкополосной аппаратуры связи. Это AD6679 (рис. 7) [4], которая, как и AD6674, относится к классу приемников промежуточной частоты. Микросхема способна оцифровывать сигналы с шириной полосы до 135 МГц. Основу микросхемы составляют два 14-разрядных аналого-цифровых преобразователя с быстродействием 500 MSPS и блоки последующей цифровой обработки сигналов: четыре широкополосных преобразователя с понижением частоты, блок изменения параметров квантования с перераспределением спектральной плотности шума и блок мониторинга значения сигнала с переменным динамическим диапазоном.

Микросхема AD6679 предназначена для использования в системах широкополосной связи с аналоговыми сигналами в полосе до 2 ГГц и оптимизирована для поддержания широкой полосы входного каскада, высокой частоты дискретизации, превосходной линейности и низкой потребляемой мощности. Аналоговые входы микросхемы имеют перестраиваемый диапазон 1,46–2,06 В, сами ядра АЦП построены на базе многокаскадной, дифференциальной конвейерной архитектуры с интегрированной логикой исправления ошибок в выходном коде, и каждое из них соединено внутри микросхемы с опциональными блоками цифровой обработки сигналов, например блоком NSR. Интегрированная схема NSR позволяет повысить отношение сигнал–шум в ограниченной полосе частот внутри полосы Найквиста.

Существенным отличием AD6679 от других высокоскоростных АЦП является вывод данных через параллельный DDR LVDS-интерфейс.

ВЫВОДЫ

Рассмотрев некоторые решения для создания схем радиоприемных устройств, выпущенных в последнее время, можно сделать некоторые выводы. Современные микросхемы аналого-цифрового преобразования и первичной цифровой обработки сигналов позволяют создавать приемники, работающие в очень широком диапазоне частот с сигналами различных стандартов. Это обеспечивается использованием схемы прямого преобразования и такими особенностями микросхем–приемников ПЧ, как большой динамический диапазон, широкий частотный диапазон аналогового входа, встроенные функции цифровой обработки сигнала с возможностью их настройки путем программирования. Реализация приемников по схеме с преобразованием сигнала на промежуточной частоте позволяет уменьшить количество элементов схемы, уменьшить габариты, энергопотребление и зачастую снизить стоимость решения в целом. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. www.analog.com/adrf6518
2. www.analog.com/ad6676
3. www.analog.com/ad6674
4. www.analog.com/ad6679
5. Umesh Jayamohan. *Not your grandfather's adc: RF sampling ADCs offer advantages in systems design.* <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/Not-Your-Grandfathers-ADC-RF-Sampling-ADCs-Offer-Advantages-in-Systems-Design.pdf>
6. Alex Zou. *Digital signal processing in IF/RF data converters.* <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/Digital-Signal-Process-in-IF-RF-Data-Converters.pdf>
7. Аналого-цифровое преобразование. Под ред. Уолта Кестера. М.: «Техносфера». 2007.