

КАК ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ АЦП ПОЗВОЛЯЮТ РЕАЛИЗОВЫВАТЬ ЭФФЕКТИВНЫЕ SDR-РЕШЕНИЯ

ВИКТОР АЛЕКСАНДРОВ, технический консультант, ИД «Электроника»

Последние достижения в области высокоскоростных АЦП сделали возможным создание новых SDR-решений, которые позволяют упростить архитектуру радиосистемы, расширить рабочую полосу частот и обеспечить высокий уровень чувствительности. В статье представлены особенности построения архитектуры широкополосных SDR-систем на базе высокоскоростных АЦП. Сделан обзор ключевых параметров АЦП, которые определяют характеристики радиосистемы. Предложен набор параметров, на основе которых следует выбирать высокоскоростные АЦП для построения оптимальных и эффективных SDR-систем.

Ключевыми задачами коммуникационных систем следующего поколения являются передача намного большего объема данных и возможность реконфигурирования системы при одновременном сокращении потребляемой мощности, уменьшении площади, занимаемой системой на плате, и снижении стоимости. Эти, во многом взаимоисключающие, требования стимулируют поиск новой системной архитектуры, позволяющей решать новые задачи на рынке коммуникаций. Среди этих задач можно выделить следующие:

- увеличение числа приемных каналов с целью обеспечения передачи и обработки дополнительного объема данных;
- расширение возможности перепрограммирования системы для снижения стоимости ее последующей модернизации и реализации новых требований заказчика;
- снижение энергопотребления, что позволяет увеличить надежность системы, обеспечить соответствие экологическим нормам и сни-

зить текущие расходы на поддержку системы;

- уменьшение площади, занимаемой системой на печатной плате, и сокращение числа необходимых комплектующих.

Эти требования рынка могут быть эффективно решены с помощью нового класса широкополосных программно-определяемых радиосистем (software-defined radio — SDR).

Большие надежды операторов связи на SDR-системы связаны с тем, что со временем эти системы позволят использовать одну сеть и одну инфраструктуру, способную обрабатывать широкий спектр частот и стандартов. Это требует применения более гибкой архитектуры радиосистемы, использующей более широкий частотный диапазон, чем требовалось ранее. Кроме того, необходимо обеспечить и более широкий динамический диапазон по сравнению с тем, который требуется для построения узкополосных приложений. В конечном итоге операторы связи будут работать в радиосреде с

несколькими несущими, использующими модуляцию различных типов и разную полосу частот, а также обладающими другими различными свойствами.

Последние достижения технологий АЦП (12-разрядное разрешение при частоте 3,6 Гвыб/с) позволили создать широкополосные SDR-системы, которые могут одновременно обрабатывать множество каналов на высокой входной частоте. Благодаря новым возможностям АЦП можно разрабатывать системы, которые оцифровывают всю полосу входных частот с высоким разрешением, устраняя необходимость использования множества приемных трактов или дорогих аналоговых фильтров. В этом случае все каналы фильтрации могут быть реализованы в цифровом виде, что позволяет уменьшить мощность потребления, площадь на плате и стоимость системы, а также улучшить системные характеристики (см. рис. 1 и 2). Перенос обработки сигнала в цифровую область также обеспечивает более простое программирование и реконфигурирование параметров системы в процессе работы, создавая полностью программируемые (или программно-определяемые) системы.

Несмотря на то, что такое фундаментальное изменение архитектуры обеспечивает существенное улучшение характеристик системы и снижает ее стоимость, это требует также изменения методологии оценки АЦП. Традиционные параметры АЦП (динамический диапазон без паразитных составляющих (SFDR), эффективное число бит (ENOB) и отношение сигнал/шум (SNR)), оценивающие характеристики системы для синусоидального сигнала одного тона

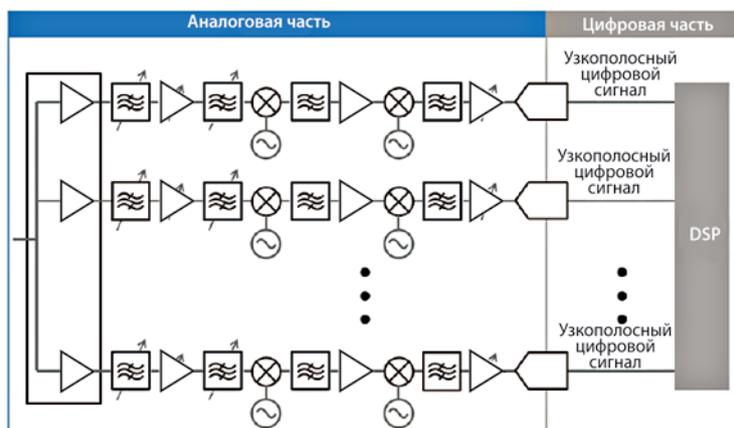


Рис. 1. Традиционная архитектура аппаратно-определяемой радиосистемы

во всей полосе Найквиста, неприемлемы для систем, в которых не используется вся полоса Найквиста и которые не осуществляют прием только синусоидальных сигналов одной частоты. Чтобы точно определить характеристики АЦП для широкополосной SDR-системы, требуется другой набор параметров.

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ И ПАРАМЕТРЫ АЦП

Одним из наиболее важных параметров любой радиосистемы является чувствительность (также широко используют понятие динамического диапазона системы), которая определяется конфигурацией приемной части радиосистемы. Говоря простым языком, чувствительность определяет способность радиоприемника эффективно обрабатывать сигналы очень малого уровня на входе антенны и измеряется в дБм. В большинстве случаев чувствительность системы определяется отношением сигнал/шум АЦП, которое измеряется в дБс или дБFS (дБс — это отношение сигнала к шуму относительно несущей частоты, а дБFS — относительно полной шкалы входного сигнала АЦП).

Обычно чувствительность определяется при двух предельных входных условиях (см. рис. 3): сигнал наименьшего уровня, который может быть принят в отсутствие каких-либо сигналов помехи, и сигнал наименьшего уровня, который может быть принят при наличии сильных помех в соседних каналах. Эти два предельных случая можно рассматривать как неблокирующий и блокирующий режимы.

Как видно из рисунка 3а, чувствительность в неблокирующем режиме обычно ограничена уровнем шума в полосе принимаемых частот. Рисунок 3б показывает, что чувствительность в блокирующем режиме обычно ограничена из-за искажений сигнального канала, т.к. искажения от смежных каналов могут попадать в рабочую полосу частот. Поскольку устойчивое функционирование системы обычно должно быть обеспечено как в блокирующем и неблокирующем режимах, чувствительность системы ограничена как шумом, так и искажениями сигнального канала. Как главный компонент большинства широкополосных SDR-систем, АЦП играет доминирующую роль в определении шумовых характеристик и искажений в системе.

Обычно уровень шума и искажений АЦП определяется такими параметрами АЦП как SNR, SFDR и ENOB. SNR измеряется на входном однональ-

ном сигнале и определяется как отношение мощности однонального сигнала к сумме мощностей сигналов во всей полосе Найквиста, исключая гармоники входного сигнала. SFDR измеряется аналогично с использованием однонального сигнала и определяется как отношение мощности этого сигнала к следующей наибольшей паразитной составляющей во всей полосе Найквиста. Наконец, ENOB также измеряется с использованием однонального сигнала и определяется как отношение мощности этого синусоидального сигнала к сумме мощностей сигналов во всей полосе Найквиста. Заметим, что ENOB соединяет SNR и SFDR в одном параметре.

Одним из ключевых преимуществ SDR-систем является способность принимать более широкий диапазон частот, чем в обычных радиосистемах, без необходимости внесения изменений в аппаратную часть системы. Это особенно привлекает разработчиков радиосистем, учитывая огромное число частот и стандартов в мире. Например, GSM может работать на частотах 400, 850, 900, 1800, 1900 МГц и даже 2500...2690 МГц. 3GPP исполь-

зует 1800, 1900 и 2100 МГц, а WiMAX — 2500 и 3500 МГц.

Во множестве частотных диапазонов оцифровка максимально возможных частотных диапазонов с помощью АЦП становится огромным преимуществом. Следовательно, именно частота дискретизации АЦП становится критичной характеристикой для таких систем. Согласно критерию устойчивости Найквиста, АЦП способен эффективно оцифровывать сигнал без эффекта наложения ложных частот, которые приводят к искажениям сигнала в полосе частот, равной половине частоты дискретизации ($F_s/2$). Таким образом, для АЦП с частотой дискретизации 200 Мвыб/с максимальная полоса частот, которая может быть эффективно оцифрована, составляет 100 МГц.

Кроме приемного канала требование по широкой полосе пропускания является ключевым и для передающей части радиосистемы. Поскольку стоимость усилителя мощности пропорциональна его выходной мощности, важнейшим способом снижения общего количества комплектующих и текущих расходов является увеличе-

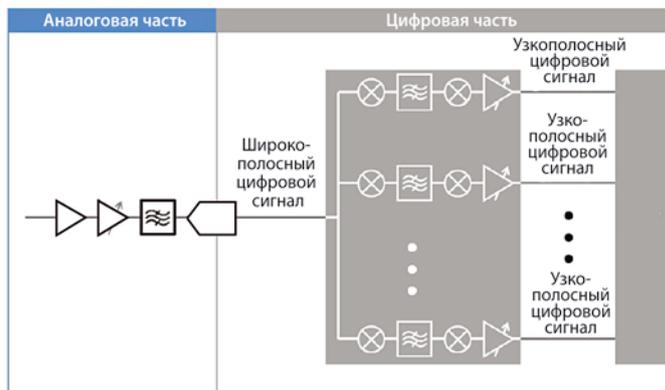


Рис. 2. Архитектура широкополосной программно-определяемой радиосистемы

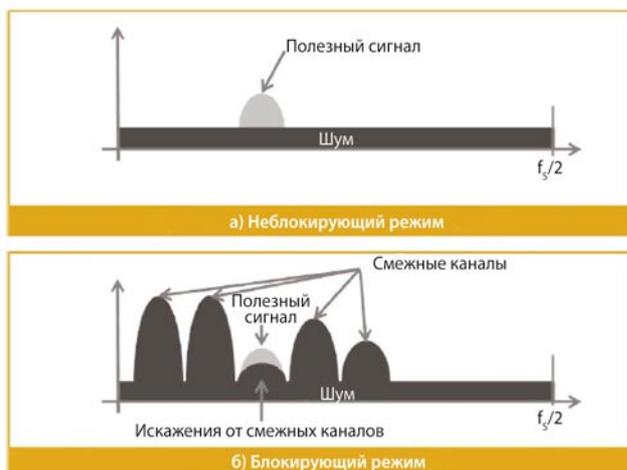


Рис. 3. Условия для входного сигнала при измерении чувствительности (динамического диапазона) системы

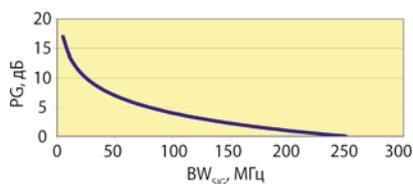


Рис. 4. Зависимость коэффициента расширения спектра сигнала от ширины полосы частот полезного сигнала при частоте дискретизации АЦП $F_s = 500$ Мвыб/с

ние его эффективности. Современные цифровые алгоритмы коррекции предскажений, которые линеаризуют характеристику усилителя мощности передатчика, основаны на использовании обратной связи с цифровым процессором. Он обрабатывает оцифрованные данные в полосе частот, ширина которой многократно превосходит ширину полосы передаваемого сигнала. Это, в свою очередь, требует, чтобы АЦП был способен оцифровывать сигнал на очень высокой частоте.

Кроме способности эффективно преобразовывать аналоговый сигнал в максимальной полосе частот, высокая частота дискретизации АЦП обеспечивает дополнительное преимущество, связанное с так называемым коэффициентом расширения спектра сигнала (processing gain). Обычно шум равномерно распределен по всей полосе Найквиста. Когда приемник обрабатывает сигнал в определенной полосе в пределах этой зоны, мощные цифровые фильтры могут существенно ослабить внеполосный шум. Если полезный сигнал имеет полосу частот BW_{SIG} , а АЦП оцифровывает сигнал на частоте F_s , эффективный коэффициент расширения спектра сигнала (PG) можно рассчитать по формуле:

$$PG = -10 \log \left(\frac{BW_{SIG}}{F_s/2} \right)$$

На рисунке 4 показана зависимость PG от ширины полосы частот полезного сигнала при частоте дискретизации АЦП $F_s = 500$ Мвыб/с.

При оценке отношения сигнал/шум системы следует также учитывать джиттер, т.к. он в конечном итоге влияет на величину SNR. SNR связано с джиттером следующим уравнением:

$$SNR = -20 \log_{10} (2\pi f_{in} t_{jitter}),$$

где f_{in} — это частота входного аналогового сигнала, а t_{jitter} — среднеквадратичная величина джиттера системы. Внутренний джиттер АЦП добавляется к джиттеру внешнего тактового сигнала, который управляет АЦП.

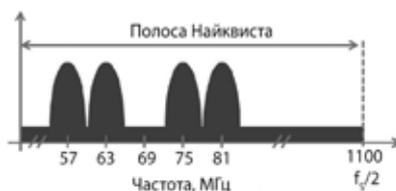


Рис. 5. Пример частотного спектра системы кабельного телевидения с каналами на частотах 57, 63, 69, 75 и 81 МГц

Заметим, что SNR не зависит от частоты дискретизации АЦП, а напрямую связан с частотой входного аналогового сигнала. Это фундаментальное ограничение является главным фактором, который следует учитывать при выборе промежуточной частоты приемника. Преимущества более простой архитектуры приемной части SDR-системы (что влияет на ее стоимость) находят в противоречии с ограничениями, которые накладывает суммарный джиттер системы при увеличении промежуточной частоты.

ОГРАНИЧЕНИЯ ТРАДИЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АЦП

SNR, SFDR и ENOB являются параметрами, которые определяют характеристики АЦП во всей полосе Найквиста при подаче на вход АЦП синусоидального однотонного сигнала. Однако в большинстве случаев входные сигналы не являются однотонными синусоидальными, а полоса сигнала, который необходимо оцифровывать, почти никогда не равна полосе Найквиста. Многие приложения предназначены для обработки несинусоидальных сигналов с полосой, ширина которой намного меньше ширины всей входной полосы. Вот некоторые из них:

- кабельное телевидение (6/8-МГц каналы в 1,1-ГГц входной полосе);
- спутниковое телевидение (как правило, 36-МГц каналы в 500-МГц входной полосе);
- мультимедийные/мультимедийные базовые станции (200-кГц каналы в 20-МГц полосе частот);
- осциллографы (входная полоса может занимать менее 10% полосы Найквиста);
- метеорологические радиолокационные станции (принятые данные занимают не более 10% полосы Найквиста).

Чтобы проиллюстрировать ограничения обычных характеристик АЦП, которые применяются к такого рода системам и сигналам, рассмотрим спектр системы кабельного телевидения с четырьмя каналами, передающими сигнал на частотах 57,

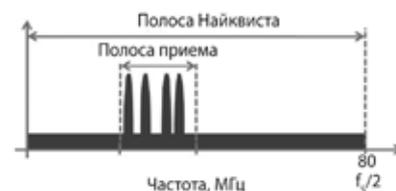


Рис. 6. Спектр мультимедийной базовой станции GSM с 20-МГц полосой приема, центрированной на частоте 30 МГц при скорости дискретизации 160 Мвыб/с

63, 75 и 81 МГц (см. рис. 5). Поскольку спектр системы кабельного телевидения может достигать до 1,1 ГГц, частота дискретизации АЦП должна быть равна, по крайней мере, 2,2 Гвыб/с. Если мы хотим принимать сигнал в канале на частоте 69 МГц, то наилучшим параметром, характеризующим функционирование системы, будет наименьший уровень мощности, который может быть принят на данной частоте при наличии шума в системе и сигналов в смежных каналах.

Если бы мы рассматривали шумовые характеристики нашей SDR-системы на основе традиционных параметров АЦП, то для этого мы использовали бы отношение сигнал/шум, которое интегрирует уровень шума в полосе 0 МГц...1,1 ГГц. Но нас интересует лишь полоса в 6 МГц из всей полосы Найквиста. Заметим, что в каналах между 54 и 84 МГц вторые и третьи гармоники не возникают. Следовательно, искажения от второй и третьей гармоник (которые обычно ограничивают SFDR) не будут влиять на какие-либо сигналы на частоте 69 МГц. Учитывая, что SNR и SFDR не предоставляют полезной информации о характеристиках данной SDR-системы, эффективное число бит, которое сочетает в себе SNR и SFDR, также является бесполезным показателем для такой системы.

Другим примером ограничений традиционных характеристик АЦП является мультимедийная базовая станция GSM. В обычной мультимедийной GSM-системе в полосе частот 20 МГц могут приниматься до четырех 200-кГц GSM-каналов (см. рис. 6). Если предположить, что частота дискретизации АЦП равна 160 Мвыб/с, то SNR будет учитывать шум в полосе частот 80 МГц. Однако в данном приложении нас интересует только шум в 200-кГц GSM-канале, а не во всей 80-МГц полосе Найквиста. А если принять, что 20-МГц полоса в такой системе центрирована на частоте 30 МГц, ограничения по SFDR даже еще сильнее, чем в системе кабельного телевидения, пример которой был приведен выше. В такой системе вторая и третья гармоники любого сигнала в 20-МГц полосе могут никогда не появиться, поэтому

SFDR (которое обычно ограничено второй и третьей гармониками) не влияет на характеристики системы в 20-МГц полосе приема. Поскольку SNR и SFDR и в данном случае не отражают реальную картину, ENOB снова оказывается бесполезным для оценки характеристик данной SDR-системы.

Эти примеры иллюстрируют ограничения традиционных характеристик АЦП. Когда полоса сигнала меньше полосы Найквиста (в особенности, когда одновременно осуществляется прием множества каналов при наличии широкополосных помех), такие показатели как SNR, SFDR и ENOB являются бесполезными. Кроме того, эти показатели относятся только к синусоидальным однотонным входным сигналам, а не к широкополосным сигналам, которые присутствуют в большинстве реальных приложений. Поэтому возникает необходимость в других параметрах, которые более точно отражают характеристики АЦП в SDR-системе, используемой для приема реальных сигналов.

ХАРАКТЕРИСТИКИ АЦП ДЛЯ SDR-СИСТЕМ

К счастью, нам не нужно изобретать новые характеристики для описания работы SDR-систем. В большинстве технической документации на АЦП уже содержатся две более полезные характеристики:

- уровень шума;
- интермодуляционные искажения (IMD).

Кроме того, имеется еще одна характеристика — коэффициент мощности шума (NPR), который также полезен для оценки работы SDR-системы.

Уровень шума АЦП отражает плотность шума относительно входа АЦП (см. рис. 7) и обычно измеряется в единицах на Гц (дБс/Гц, дБм/Гц и др.). В качестве примера рассмотрим недавно выпущенный компанией National Semiconductor АЦП ADC12D1600, уровень шума которого составляет -149,6 дБм/Гц. Если использовать этот АЦП в ранее описанном примере мультисигментной базовой станции GSM, то общий уровень шума в 200-кГц канале составит -96,6 дБм. При максимальном уровне входного сигнала 2 дБм динамический диапазон АЦП для несущей частоты GSM будет равен 98,6 дБ, что намного больше требуемого минимума, равного 85 дБ.

Уровень шума можно также использовать для того, чтобы сравнивать АЦП с различными максимальными частотами дискретизации. Например, многие 16-разрядные АЦП с частотой дискретизации более 100 Мвыб/с имеют уровень шума около -150 дБм/Гц.

Интермодуляционные искажения (IMD) АЦП отражают содержание паразитных составляющих сигнала, когда по крайней мере два входных тональных сигнала смешиваются, в результате чего возникают искажения (см. рис. 8). IMD можно измерить с помощью однотональных синусоидальных сигналов или с помощью сигналов с ограниченным спектром. Возвращаясь к примеру системы кабельного приемника (см. рис. 5), заметим, что каналы на частотах 57 и 63 МГц, а также каналы на частотах 75 и 81 МГц создадут интермодуляционные искажения третьего порядка (IMD3) на частоте 69 МГц. Для АЦП ADC12D1600 2-тональные IMD3 составляют -56 дБс, центрированные на частоте 1,2 ГГц. Мощность интермодуляционных искажений на частоте 69 МГц на 53 дБ ниже, чем в смежных каналах. Поэтому АЦП ADC12D1600 может осуществлять прием на 69-МГц канале и поддерживать отношение мощности несущей к шуму (CNR) на уровне 30 дБ.

Наконец, коэффициент мощности шума (NPR) является параметром, который измеряет как шум, так и искажения АЦП в пределах данной полосы частот. Измерения выполняются путем подачи широкополосного сигнала на АЦП и вырезания полосы частот (см. рис. 9). NPR — это отношение мощности шума в вырезанной полосе (PN на рис. 9) к мощности шума равной полосы, смежной с вырезанной (PA на рис. 9). АЦП ADC12D1600 обеспечивает NPR на уровне 52 дБ, когда на АЦП подается 500-МГц входной сигнал, тогда для кабельного тюнера 69-МГц канал может быть принят при CNR, равным 30 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поскольку все больше приложений реализуется на базе широкополосных SDR-систем, которые обеспечивают высокую функциональность и гибкость, то требования к широкополосным АЦП продолжают возрастать. Внутриполосные характеристики АЦП — уровень шума, интермодуляционные искажения (IMD) и коэффициент мощности шума (NPR) — тесно связаны с такими параметрами как SNR, SFDR и ENOB. Однако главная разница между двумя наборами параметров заключается в том, что уровень шума, IMD и NPR отражают внутриполосные характеристики АЦП, а



Рис. 7. Уровень шума АЦП

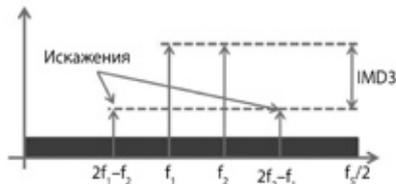


Рис. 8. Интермодуляционные искажения третьего порядка АЦП

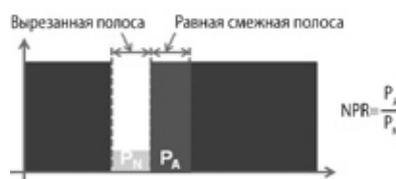


Рис. 9. Коэффициент мощности шума АЦП

SNR, SFDR и ENOB отражают характеристики АЦП в полосе Найквиста для одночастотных синусоидальных сигналов. Внутриполосные характеристики АЦП ориентированы на конкретные приложения и поэтому способны дать исчерпывающую информацию при выборе АЦП для применения в SDR-системах различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Paul Buckley. 12-bit ADC paves the way for new generation of software-defined radio solutions//EETimes.
2. Scott Kulchyski. Software Defined Radio: Don't Talk to Me about ENOBs//EETimes RF & Microwave Designline, September 2010.
3. Yiannis N. Papantonopoulos. High-speed ADC technology paves the way for software defined radio//www.eetimes.com.
4. Peter B. Kenington. RF and Baseband Techniques for Software Defined Radio// Artech House Inc, 2005.

Coilcraft

www.coilcraft.com

ИНДУКТИВНОСТИ • ТРАНСФОРМАТОРЫ
ФИЛЬТРЫ • ДРОССЕЛИ

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР В РОССИИ

111024, Москва,
Авиамоторная ул., д. 8а
Телефон: (495) 957-77-45
Факс: (495) 925-10-64

sales@radiocomp.net
www.radiocomp.net

Уникальные
радиокомпоненты
ведущих фирм мира

РАДИОКОМП®