

Аналого-цифровые преобразователи с понижением частоты

Часть 1

Виктор Алексеев (victor.alexeev@gmail.com)

В современных методах оцифровки и обработки сигналов широко применяются технологии с понижением частоты. В первой части статьи рассматриваются принципы работы цифровых преобразователей с понижением частоты. Особое внимание уделяется проблеме спектральных наложений (алиасинга).

В различного рода радиоэлектронных устройствах широко используется метод понижения частоты до промежуточной с дальнейшей цифровой обработкой сигнала. Очевидно, что, чем выше частота дискретизации, тем лучше можно преобразовать аналоговый сигнал в цифровой в передатчике и тем точнее восстановить этот сигнал в приёмнике. В связи с этим в настоящее время в телекоммуникационных, аэрокосмических, медицинских и других приложениях наблюдается общая тенденция к смещению рабочего частотного спектра в микроволновую область.

Известно, что одним из возможных вариантов уменьшения искажений при цифровой обработке аналоговых сигналов является наращивание количества понижающих преобразова-

телей (см. рис. 1). В этой традиционной схеме предварительная селекция сигнала осуществляется полосовым фильтром. Смеситель преобразует частоту полезного сигнала в промежуточную (ПЧ), затем в низкочастотной области спектра сигнал оцифровывается с помощью стандартного аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Более эффективными методами при решении подобных задач являются технологии SDR (Software Define Radio – радио с цифровой обработкой), среди которых особое место занимают методы прямой оцифровки сигнала. В приёмнике SDR аналоговый сигнал, принятый антенной, преобразуется в цифровой. Устройства, выполняющие эту функцию, называются цифровыми преобразователями с понижением частоты

(ЦППЧ), или DDC (Digital Down Converter). В передатчике SDR цифровой сигнал трансформируется в аналоговый и передаётся через антенну в эфир. При этом используется метод оцифровки с повышением частоты (DUC – Digital Up Conversion), благодаря которому цифровой широкополосный сигнал преобразуется в цифровой сигнал промежуточной частоты. Более подробно вопросы цифровой обработки сигналов рассмотрены в [1].

В теории оцифровки сигналов широко применяются методы, в которых вещественный аналоговый сигнал раздельно обрабатывается в виде пары взаимно ортогональных сигналов: действительной части (I, Re – синфазный канал) и мнимой части (Im, Q – квадратурный канал). При этом вещественный аналоговый сигнал S можно преобразовать в комплексный и представить его в виде действительной (Re) и мнимой (Im) частей: $S(t) = I + im = Re + Q$, где i – мнимая единица. В данной статье такие термины как, например, «комплексный сигнал», «мнимая часть», «вещественная часть» будут употребляться именно в том смысле, в котором они используются в классической математике и в теории цифровой обработки сигналов.

Упрощённая структурная схема приёмника аналогового сигнала с АЦП, построенного на основе ЦППЧ, показана на рисунке 2. В технологии оцифровки сигнала с понижением частоты входной аналоговый сигнал раздельно обрабатывается в двух каналах в виде ортогональных вещественных сигналов. Часто такую обработку называют квадратурной. В качестве основных достоинств данного метода можно выделить отсутствие паразитных частот при спектральных преобразованиях и простоту процессов модуляции и демодуляции.

В ЦППЧ-преобразователях практически мгновенно оцифровывается весь спектр сигналов от 0 Гц до верхней границы. При использовании такой схемы отпадает необходимость в применении дополнительных аналоговых устройств для дальнейшей обработки сигнала. Оцифрованный сигнал посту-

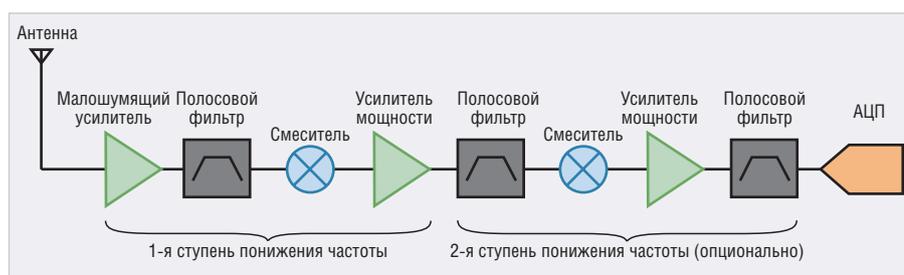


Рис. 1. Классическая схема приёмника аналогового сигнала с понижающим преобразователем

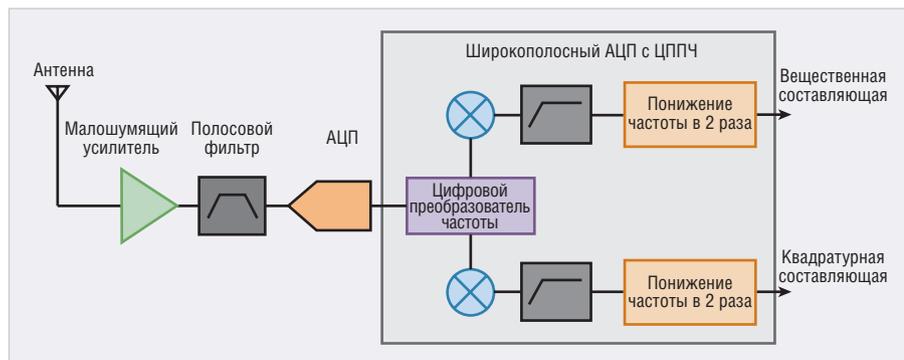


Рис. 2. Структурная схема приёмника аналогового сигнала с АЦП на основе ЦППЧ

пает непосредственно в процессорный блок. Современные АЦП могут работать в диапазоне до нескольких гигагерц, поэтому для большинства приложений вполне достаточно одноступенчатой схемы ЦППЧ-преобразователя.

Технология ЦППЧ предоставляет возможность фильтрации с использованием метода децимации, с помощью которого из спектра удаляется часть лишних отсчётов дискретного сигнала. За счёт этого можно значительно сузить полосу и упростить обработку сигнала. Следует обратить внимание на то, что процедура децимации первоначально включает в себя согласование дискретизации в соответствии с теоремой Котельникова (точное восстановление сигнала возможно только в том случае, если частота дискретизации выше, чем удвоенная максимальная частота в его спектре). На следующем этапе осуществляется фильтрация частот, превышающих новую частоту Найквиста, равную половине частоты дискретизации. Указанные процессы помогают существенно расширить динамический диапазон и улучшить соотношение сигнал/шум. Дополнительную информацию по этим вопросам можно найти в [2, 3].

Принципы работы ЦППЧ-преобразователей в микросхемах АЦП AD9680-500

В данной статье рассмотрены особенности работы цифровых преобразователей с понижением частоты в микросхемах АЦП AD9680-500. Аналогичные по принципу работы и структурной схеме ЦППЧ реализованы и в других АЦП производства Analog Devices, например AD9690, AD9691, AD9684.

Из теории аналого-цифровой обработки сигналов известно, что частоты входных сигналов выше и ниже частот Найквиста могут вызывать ложные выбросы. АЦП воспринимает такие выбросы как частоты входного аналогового сигнала и неправильно их обрабатывает. В результате могут возникнуть серьёзные ошибки при приёме сигнала и обратном преобразовании с помощью ЦАП. Таким образом, проблемы ложных выбросов крайне важны, и их обязательно необходимо учитывать при разработке точной широкополосной аппаратуры.

Рассмотрим работу ЦППЧ для двухканального 14-разрядного АЦП AD9680-500. Быстродействие данного АЦП составляет 1 Мвыб/с. Он

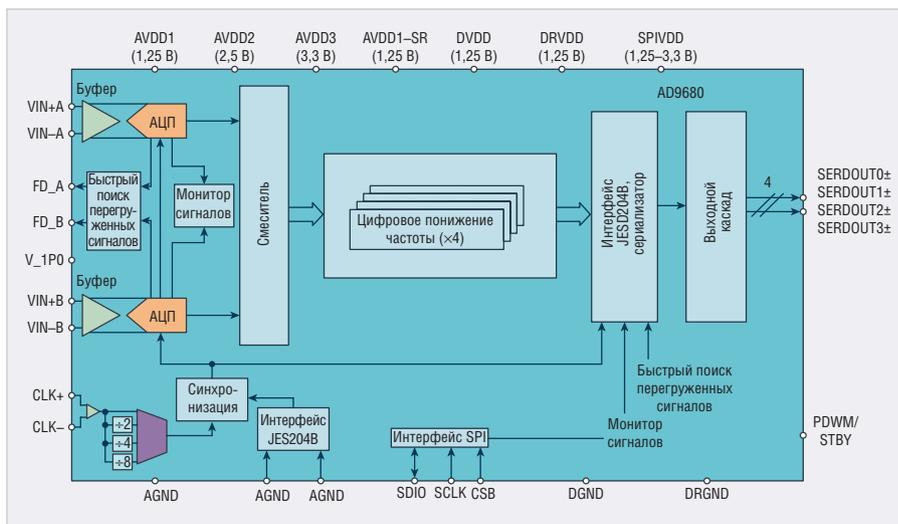


Рис. 3. Структурная схема АЦП AD9680

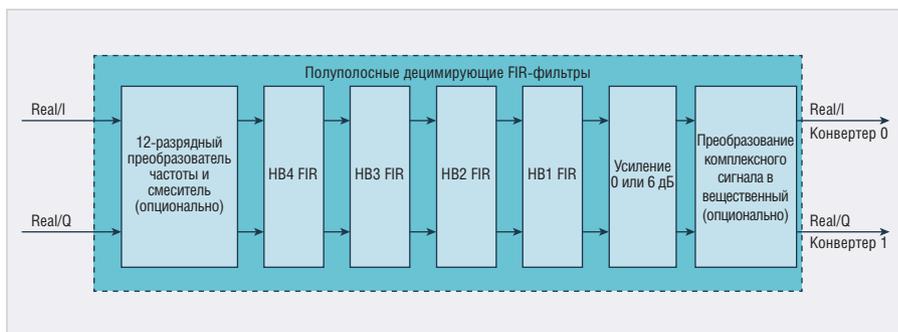


Рис. 4. Структурная схема блока цифровой обработки сигналов АЦП AD9680

предназначен для оцифровки широкополосных аналоговых сигналов на частотах до 2 ГГц и оптимизирован для поддержания широкой полосы входного каскада при высокой частоте дискретизации. Структурная схема блока сигнального процессора ЦППЧ АЦП AD9680 приведена на рисунке 3. Сигнальный процессор AD9680 состоит из следующих основных блоков: широкополосный аналоговый входной каскад, интегрированный источник опорного напряжения, ЦППЧ-преобразователь, выходные каскады, схемы синхронизации. Входы аналоговых сигналов и тактовой синхронизации выполнены по дифференциальной схеме. Выход каждого из двух каналов АЦП подключён к своему ЦППЧ-преобразователю.

Структурная схема блока цифровой обработки сигналов АЦП AD9680 приведена на рисунке 4. Каждый ЦППЧ-преобразователь состоит из четырёх последовательно соединённых каскадов обработки сигнала, включающих в себя 12-разрядный преобразователь частоты (генератор с цифровым программным управлением) и четыре полуполосных децимирующих фильтра.

Преобразователь частоты сдвигает спектр влево, затем проводится процесс децимации с помощью FIR-фильтров, после чего реализуются процедуры усиления и преобразования комплексного сигнала в действительную форму.

Анализ эффектов спектральных наложений выходных спектров АЦП с помощью программы Frequency Folding Tool

Свободно распространяемая программа Frequency Folding Tool (FFT) входит в комплект средств разработки ADI Data Converter Tools и доступна на сайте Analog Devices [4]. Данное приложение предназначено для исследования эффектов спектральных наложений входного сигнала и его гармоник при оцифровке с помощью АЦП. В русскоязычной технической литературе в качестве перевода термина aliasing часто используется прямая калька с английского – алиасинг.

При работе с программой FFT пользователь может выбрать однотональный входной сигнал или сигналы с модуляцией несущих частот. При этом эффект алиасинга можно наблюдать в десяти зонах Найквиста. Стоит напомнить, что

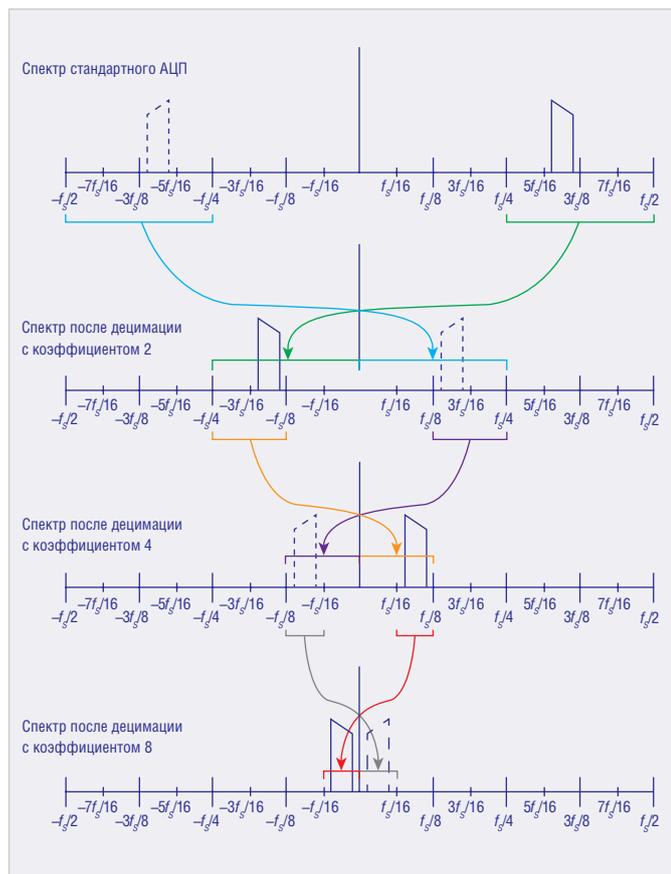


Рис. 5. Обобщённый пример результатов работы элементов АЦП

диапазон от 0 до половины частоты оцифровки – это первая зона Найквиста, от $f_s/2$ до f_s – вторая зона Найквиста и т.д. Данный тип анализа является важным этапом исследования при проектировании устройств с АЦП с встроенным ЦППЧ.

Для начала следует рассмотреть, что происходит со спектром с точки зрения теории (см. рис. 5). Преобразователь частоты и смеситель (поставляется опционально) формируют из вещественного сигнала комплексный дискретный сигнал и линейно сдвигают его спектр по оси частот с таким расчётом, чтобы центральная частота целевой полосы стала нулевой промежуточной частотой. Как только отрицательный сигнал в комплексной области выходит за пределы половины частоты сэмплирования ($f_s/2$), он возвращается назад в первую зону Найквиста. Затем сигнал проходит через первый фильтр децимации НВ1, который имеет коэффициент децимации (DCM), равный 2.

После первого этапа децимации с коэффициентом 2 спектр с диапазоном $f_s/4..f_s/2$ сузился до диапазона $-f_s/4..DC$ (смещение нуля). Аналогичным образом уменьшается отрицательный диапазон: от $-f_s/2..f_s/4$ до $DC..f_s/4$. Затем

сигнал проходит через второй фильтр НВ2, который также имеет коэффициент децимации 2. На данном этапе спектр в диапазоне $f_s/8..f_s/4$ трансформируется в диапазон $-f_s/8..DC$. Соответственно, диапазон $-f_s/4..f_s/8$ преобразуется в $DC..f_s/8$.

На рисунке 6 показаны результаты моделирования этапов прохождения сигнала через модуль обработки блока ЦППЧ. В данном примере использованы следующие параметры:

- скорость сэмплирования на входе – 491,52 Мвыб/с;
- частота входного аналогового сигнала – 150,1 МГц;
- коэффициент децимации DCM – 4;
- частота настройки преобразователя частоты – 155 МГц.

Фактическая частота из-за собственного разрешения генератора составляет 154,94 МГц ($150+4,94=154,94$ МГц). В результате получается частота дискретизации, равная 122,88 Мвыб/с. Стоит отметить, что в АЦП прямого преобразования численные значения частоты сэмплирования и тактовой частоты совпадают.

В данном примере рассматривается вариант АЦП с комплексным выходным сигналом. На рисунке 6 можно выделить следующие этапы отклика:

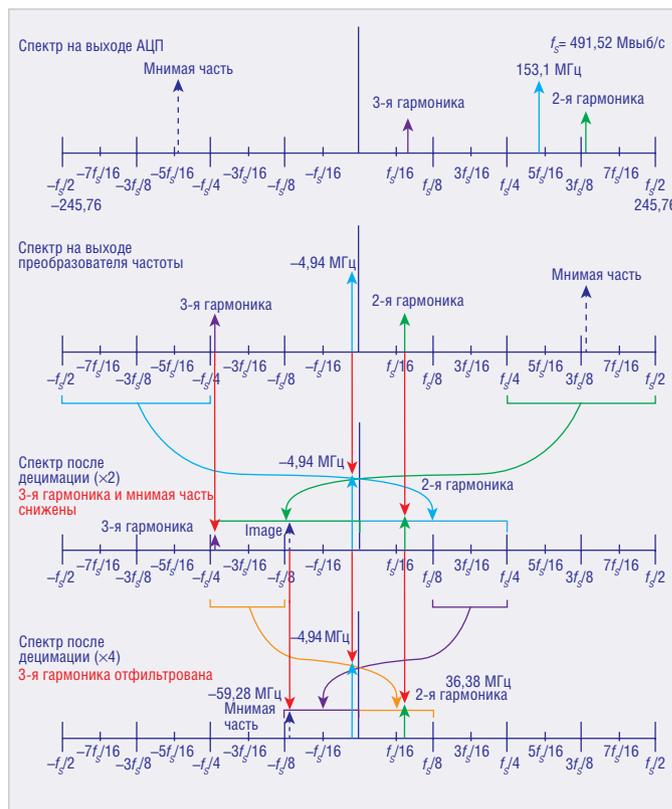


Рис. 6. Преобразование спектра после прохождения через цифровой преобразователь частоты и фильтры децимации с учётом мнимой части сигнала

- смещение спектра на выходе преобразователя частоты:
 - основная частота перемещена со 150,1 МГц на $-4,94$ МГц;
 - мнимая часть основной частоты сдвинута со $-150,1$ МГц до $186,48$ МГц;
 - вторая гармоника сдвинута со $191,32$ МГц до $36,38$ МГц;
 - третья гармоника сдвинута с $41,22$ МГц до $-113,72$ МГц;
- спектр после децимации с коэффициентом 2:
 - основная частота остаётся равной $-4,94$ МГц;
 - мнимая часть базовой частоты сдвигается до $-59,28$ МГц и ослабляется фильтром децимации НВ1;
 - вторая гармоника остаётся на частоте $36,38$ МГц;
 - третья гармоника ослабляется фильтром децимации НВ1;
- спектр после децимации с коэффициентом 4:
 - основная частота остаётся равной $-4,94$ МГц;
 - мнимая часть основной частоты остаётся равной $-59,28$ МГц и ослабляется фильтром децимации НВ2;
 - вторая гармоника остаётся на частоте $-36,38$ МГц и ослабляется фильтром децимации НВ2;

– третья гармоника фильтруется и практически полностью удаляется фильтром децимации НВ2.

ЭФФЕКТЫ НАЛОЖЕНИЯ В ВЫХОДНЫХ СПЕКТРАХ АЦП AD9680-500

В качестве первого примера в настройках FFT были выбраны следующие параметры работы АЦП AD9680-500:

- частота тактовой синхронизации – 368,64 МГц;
- частота входного аналогового сигнала – 270 МГц;
- коэффициент децимации DCM для полуполосного фильтра с конечной импульсной характеристикой – 2;
- частота настройки преобразователя частоты – 98 МГц;
- коэффициент усиления – 0 дБ.

Стоит напомнить, что в АЦП входные аналоговые сигналы – это всегда вещественные функции времени $S(t)$. При оцифровке в ЦППЧ эти сигналы обрабатываются квадратурным методом, в результате чего на выходе АЦП будет получен комплексный сигнал, содержащий вещественную и мнимую части. Процесс цифровой конверсии «вниз» включает в себя три этапа:

1. Квадратурное преобразование спектра исходного сигнала в нулевую промежуточную частоту.
2. Ограничение полосы.
3. Децимация.

На рисунке 7 показано окно программы FFT с сигналами на выходе ядра АЦП AD9680 до обработки ЦППЧ-преобразователем [5]. При тактовой частоте 368,64 МГц и частоте входного аналогового сигнала 270 МГц спектральные наложения будут возникать в первой зоне Найквиста на следующих частотах: 98,64 МГц (первая гармоника), 171,36 МГц (вторая гармоника) и –72,72 МГц (третья гармоника комплексного сигнала).

Следует пояснить, что когда речь идёт о квадратурном преобразовании и комплексном сигнале, на выходе будет наблюдаться комплексная огибающая и спектр будет расположен по обе стороны от нулевой частоты.

В общем случае вектор комплексного числа повернут относительно реальной оси на некоторый угол, называемый фазой. Если угол поворота вектора на комплексной плоскости отсчитывать против часовой стрелки, то фаза будет положительной, а если по часовой – фаза будет отрицательной. В дан-

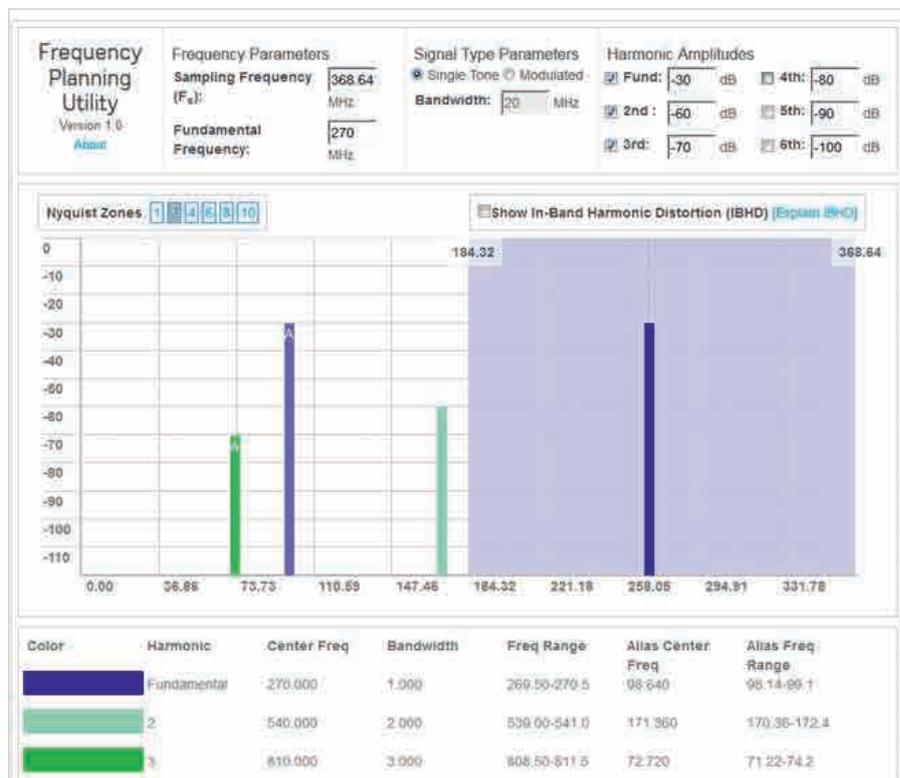


Рис. 7. Окно программы FFT с сигналами на выходе ядра АЦП AD9680 до обработки ЦППЧ-преобразователем

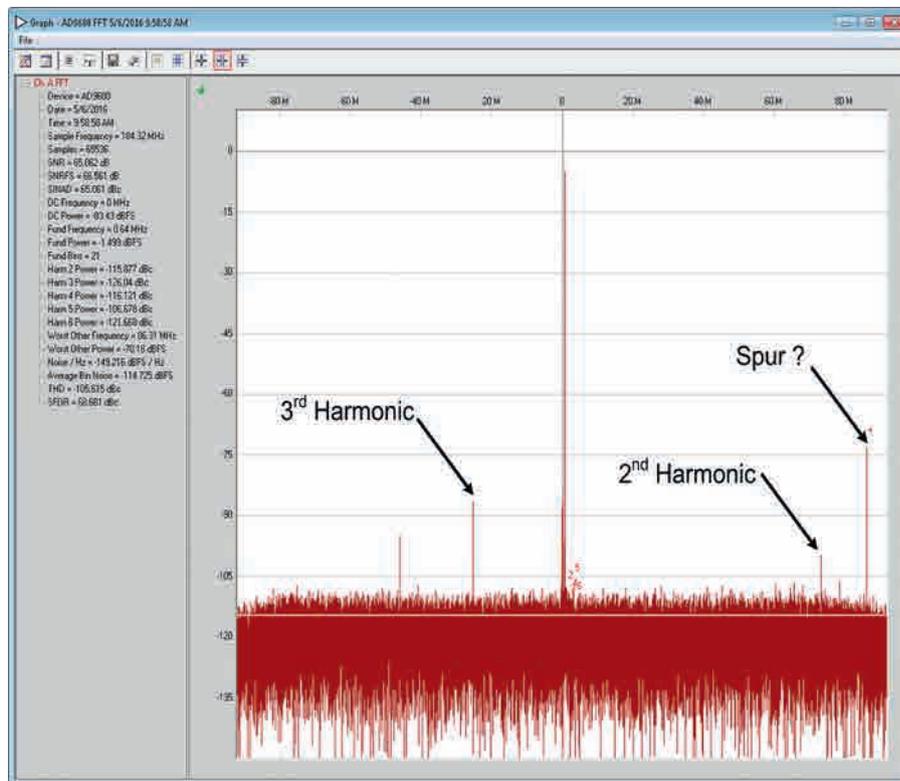


Рис. 8. Комплексный выходной сигнал после обработки ЦППЧ-преобразователем, полученный с помощью ПО VisualAnalog™

ном случае, если мнимая часть отстаёт по времени от действительной части, то эта частота будет положительной. В случае когда мнимая часть опережает по времени действительную часть, частота будет отрицательной.

Цифровой преобразователь частоты, настроенный на частоту 98 МГц, сдвигает спектр влево. Таким образом, входной аналоговый сигнал смещается с 98,64 МГц до 0,64 МГц. Вторая гармоника смещена до частоты 73,36 МГц.

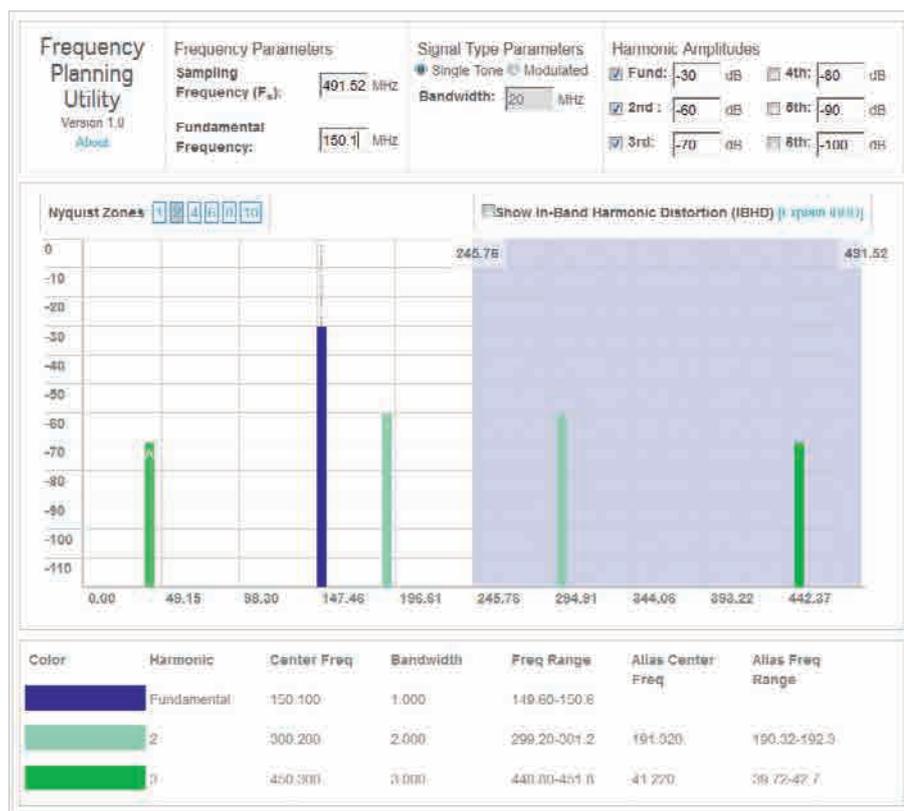


Рис. 9. Комплексный выходной сигнал АЦП AD9680, полученный с помощью FFT

Комплексный сигнал на выходе показывает, что третья гармоника снижена до $-25,28$ МГц.

На рисунке 8 показан комплексный выходной сигнал после обработки ЦППЧ-преобразователем, полученный с помощью программы VisualAnalog™, которая также входит в состав ADI Data Converter Tools и сочетает в себе мощный набор инструментов для моделирования и анализа работы быстродействующих АЦП. Данное программное обеспечение оснащено удобным инструментом ADCAnalyzer, который моделирует производительность ADC с различными входными частотами и частотами выборки. В примере, показанном на рисунке 8, заданная частота генератора составляет 98 МГц, а коэффициент децимации – 2.

Как видно из рисунка 8, на частоте 86,32 МГц присутствует алиасинг, обнаруженный с помощью FFT. Заранее определить эту частоту на основании теоретических расчётов не представляется возможным. Возникает вопрос: какое устройство ответственно за эту частоту – ЦППЧ или ядро АЦП? Необходимо подчеркнуть, что FFT и VisualAnalog™ не учитывают смещение нуля АЦП. Отладчик FFT предполагает, что он имеет дело с идеальным АЦП. Цифровой преобразователь частоты не является «умным» устрой-

ством, он просто сдвигает спектр входного сигнала относительно заданной ему пользователем частоты (в данном примере – 98 МГц). Все рассуждения, приведённые выше, были справедливы для идеального АЦП. В реальном случае у любого АЦП существует небольшое постоянное напряжение на выходе при нулевом входном сигнале, обусловленное «неидеальностью» входящих в его состав электронных компонентов. Этот эффект, называемый смещением нуля АЦП, соответствует в рассматриваемом примере частоте входного аналогового сигнала, равной 0 Гц. Именно эту частоту преобразователь сдвинул в отрицательную область до -98 МГц.

Благодаря наличию комплексной составляющей сигнала и децимации с коэффициентом 2 нулевая частота, соответствующая напряжению смещения, сдвинута в первую зону Найквиста в реальной частотной области. Если обратить внимание на преобразованный в комплексную форму входной сигнал, то можно заметить, что его основной тон сдвигается во вторую зону Найквиста на отрицательной частоте, однако затем он возвращается в реальную область спектра в первой зоне Найквиста.

В данном случае при коэффициенте децимации 2 частота

дискретизации будет составлять $368,64/2=184,32$ МГц. Половина этого значения определяет частоту Найквиста 92,16 МГц. Разница между частотой Найквиста и частотой, на которую NCO сдвинул нулевую частоту, соответствующую смещению нуля АЦП, составляет $98-92,16=5,84$ МГц. Таким образом, в реальной области спектра в первой зоне Найквиста можно наблюдать алиасинг на частоте $92,16-5,84=86,32$ МГц. Приведённый пример показывает, насколько тщательно необходимо анализировать возможные конфликтные наложения частот при особо точных процессах оцифровки аналоговых сигналов.

Можно рассмотреть работу AD9680 и на примере других параметров ЦППЧ-преобразователя:

- частота тактовой синхронизации – 491,52 МГц;
- частота входного аналогового сигнала – 150,1 МГц;
- коэффициент децимации для полуполосного фильтра с конечной импульсной характеристикой – 4;
- частота преобразователя частоты – 155 МГц;
- коэффициент усиления – 6 дБ.

Пусть, как и в первом примере, сигнал проходит через цифровой преобразователь частоты, фильтры НВ FIR и усилитель. Сигнал на выходе АЦП для этого случая показан на рисунке 9 [5]. Для указанных выше параметров входной сигнал будет перемещён в первую зону Найквиста. Вторая гармоника частоты 300,2 МГц будет иметь алиасинг в первой зоне Найквиста на частоте 191,32 МГц. Для третьей гармоники 50,3 МГц эффект конфликтных наложений будет иметь место в первой зоне Найквиста на частоте 41,22 МГц.

Во второй части статьи речь пойдёт о прохождении сигнала через FIR-фильтры при различных коэффициентах децимации и использовании отладочных средств Virtual Eval для моделирования характеристик АЦП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zou A. Digital Signal Processing in IF/RF Data Converters: www.analog.com
2. Jayamohan U. Not Your Grandfather's ADC: RF Sampling ADCs Offer Advantages in Systems Design: www.analog.com
3. Gigasample ADCs Promise Direct RF Conversion: www.electronicdesign.com
4. Frequency Folding Tool: www.analog.com
5. Harris J. What's Up With Digital Downconverters. Part 1: www.analog.com

НОВОСТИ МИРА

**В России за 2017 год
КОЛИЧЕСТВО ЗАЯВОК
НА ПАТЕНТЫ ИЗОБРЕТЕНИЙ
УПАЛО ДО УРОВНЯ 2006 ГОДА**

В 2017 году количество патентных заявок на изобретения снизилось по сравнению с 2016 годом на 12,3% до 36 454 шт., следует из данных Роспатента. Количество заявок на патенты в прошлом году упало практически до уровня 2006 года.

Российские юридические и физические лица в 2017 году подали 22 777 заявки, что на 15% меньше, чем в 2016 году. Причины: сокращение финансирования НИОКР и снижение патентной активности российских научно-исследовательских институтов и высших учебных заведений.

По количеству патентуемых изобретений лидируют Центральный федеральный округ (50,62% от общего количества поданных заявок от российских заявителей), Приволжье (15,80%) и Северо-Западный федеральный округ с долей 9,47%. Наиболее активные регионы: Москва (5547 заявок), Московская область (3126), Санкт-Петербург (1631), республика Татарстан (688), Ивановская область (649). Наименьшее коли-

чество заявок поступило из Сахалинской области (2), республики Адыгея (5), республик Алтай и Ингушетия (по 6).

Спад в этой области наблюдается и у иностранных компаний: они подали в России на 7,5% меньше заявок, чем годом ранее, – 13 677 шт. Доля иностранных заявителей в общем объеме заявок упала с 40% в 2014 году до 37% в 2017-м. Активнее всего обращались в Роспатент компании из США (3925 заявок), Германии (1536), Японии (1453), Китая (917) и Франции (887). При этом количество заявок по сравнению с прошлым годом уменьшилось у США на 9%, у Германии – на 11%, у Китая – на 22%.

В прошлом году большинство заявок на патенты – 20,85% – поступило в категорию «Удовлетворение жизненных потребностей» (медицина, сельское хозяйство, пищевое производство, одежда, мебель и т.п.). На втором месте находится категория «Технологические процессы и транспорт» (16,05%), следом идет «Химия и металлургия» (14,67%).

При этом количество договоров о предоставлении права использования лицензий выросло с 1119 в 2016 году до 1409 в 2017 году.

Продолжается снижение заявок и на регистрацию полезных моделей. Количество заявок в этой категории уменьшилось на 4,22% до 10643 шт., из них российских – 10 152 (–4,61%), иностранных – 491 (+4,69%). Количество заявок на регистрацию программы ЭВМ уменьшилось на 5,05% до 14 092 шт. Снижение произошло за счет российских заявителей (13 977 заявок, –5,2% по сравнению с прошлым годом), количество иностранных заявок немного подросло (95, +2,1%).

На государственную регистрацию товарных знаков подано 73 510 заявок (+13,5% по сравнению с 2016 годом), из них 46 600 – российскими заявителями и 26 910 – иностранными. Остальные – международные знаки с испрашиванием охраны в России.

На регистрацию промышленных образцов поступило 6487 заявки, что на 18,7% больше, чем в 2016 году. Резиденты иностранных государств подали 3224 заявки (+5%), российские – 3263 (+36%). Первое место заняла Липецкая область с 1081 заявкой. Следом идут Москва (368), Санкт-Петербург (256), Ростовская (146) и Самарская (104) области.

Пресс-служба «ЕДРИД»

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ЭЛЕКОНД



50 лет

КОНДЕНСАТОРЫ
разработка и производство

оксидно-электролитические алюминиевые
K50-15, K50-17, K50-27, K50-37, K50-68, K50-74,
K50-76, K50-77, K50-80, K50-81, K50-83, K50-84,
K50-85, K50-86, K50-87, K50-88, K50-89, K50-90,
K50-91, K50-92, K50-93, K50-94, K50-95

объемно-пористые танталовые
K52-1, K52-1M, K52-1BM, K52-1B, K52-9, K52-11,
K52-17, K52-18, K52-19, K52-20, K52-21, K52-24

оксидно-полупроводниковые танталовые
K53-1A, K53-7, K53-65(чип), K53-66, K53-68(чип),
K53-71(чип), K53-72(чип), K53-74(чип), K53-77(чип)

оксидно-полупроводниковые ниобиевые
K53-4, K53-52, K53-60

ионисторы (суперконденсаторы)
K58-20, K58-21, K58-26

**накопители электрической энергии
на основе модульной сборки суперконденсаторов**

Россия, 427968, Удмуртская Республика,
г. Сарапул, ул. Калинина, 3
Тел.: (34147) 2-99-53, 2-99-89, 2-99-77
Факс: (34147) 4-32-48, 4-27-53
e-mail: elecond-market@elcudm.ru
<http://www.elecond.ru>

Реклама

Система менеджмента качества сертифицирована на соответствие требованиям ГОСТ Р ИСО 9001-2015

interlight

MOSCOW

powered by light + building

Международная выставка декоративного
и технического освещения, электротехники
и автоматизации зданий

6–9 ноября 2018

ЦВК «Экспоцентр»

Москва



Компоненты | **NEW!**



Декоративное
освещение



Техническое
освещение



LED-технологии



Интегрированные
системы безопасности | **NEW!**



Электрические
лампы



Электротехника



Автоматизация зданий /
Умный дом



messe frankfurt

www.interlight-moscow.ru



Выставка

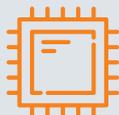
ЭЛЕКТРОНИКА
Урал

IV МЕЖДУНАРОДНАЯ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ
ВЫСТАВКА

ЭЛЕКТРОНИКА—УРАЛ 2018

27-29 НОЯБРЯ

ЕКАТЕРИНБУРГ, ЦМТЕ



Электронные компоненты
и комплектующие



Источники питания



Программное обеспечение
и услуги



Оборудование и технологии
для производства электроники

ПРОХОДИТ ОДНОВРЕМЕННО С ВЫСТАВКОЙ «ПТА-УРАЛ 2018»

WWW.PTA-EXPO.RU

ЕКАТЕРИНБУРГ



(343) 270-23-76



info@pta-expo.ru

Реклама

ОРГАНИЗАТОР

Электроника

МОСКВА



(495) 234-22-10



info@pta-expo.ru