

Аналого-цифровые преобразователи с понижением частоты

Часть 2

Виктор Алексеев (victor.alexeev@gmail.com)

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

Прохождение сигнала через FIR-фильтры при различных коэффициентах децимации

Для понижения частоты дискретизации сигнала и уменьшения скорости потока данных в ЦППЧ используются CIC-фильтры (Cascaded Integrator-Comb), которые представляют собой разновидность FIR-фильтров.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) FIR-фильтра зависит от его порядка, коэффициента децимации и задержки в дифференцирующем звене.

В идеальном случае АЧХ фильтра децимации для широкополосной обработки сигналов должна быть максимально равномерной и иметь прямоугольный спектр в полосе пропускания.

В реальных условиях на АЧХ фильтра влияют различного рода наводки и нестабильность работы элементов схемы, что приводит к потерям полезного сигнала и искажению его формы, поэтому анализ работы децимирующих фильтров, а также коррекция возможных нежелательных факторов является крайне важной задачей при проектировании широкополосных устройств цифровой обработки аналоговых сигналов. Далее будут проанализированы такие важные характеристики фильтров, как разрядность коэффициентов, порядок, окно, нормированная частота среза АЧХ, полосы пропускания и ослабления, вектор частот в полосе ослабления и другие, на примере АЦП AD9680.

В данной статье под термином «полоса пропускания фильтра» подразумевается интервал частот, в пределах которого отношение амплитуды сигнала на выходе фильтра к амплитуде колебаний на его входе не может быть ниже заданного уровня. Термин «полоса задерживания» определяет диапазон частот, в котором относительное затухание фильтра больше или равно заданному пределу. Термин «переходная полоса» обозначает диапазон частот, в котором АЧХ фильтра переходит от полосы пропускания к полосе задерживания.

Для начала следует рассмотреть общий случай отклика FIR-фильтра. На рисунке 10 показан отклик на выходе фильтра HB1 с учётом комплексной и действительной составляющих сигнала [6]. Как видно из рисунка, фильтр HB1 имеет в положительной действительной области полосу пропускания и полосу задерживания, составляющие по 38,5% каждой от

ширины реальной зоны Найквиста. При этом на переходную полосу приходится 23%. Аналогично в отрицательной комплексной области полоса пропускания и полоса задерживания составляют 38,5% от комплексной зоны Найквиста с переходной полосой, занимающей оставшиеся 23%. Таким образом, фильтр HB1 имеет полную зеркальную симметрию между действительной и комплексной частями.

Теперь следует рассмотреть случай, когда в AD9680 имеется встроенный блок ЦППЧ. Стоит отметить, что блок преобразования комплексного сигнала в вещественный (CRC-блок) поставляется как расширение стандартного варианта AD9680. Наличие CRC-блока обеспечивает реальные (не комплексные) сигналы на входе и выходе ЦППЧ. На рисунке 11 показан отклик фильтра HB1 при включённом CRC-блоке. Данный блок автоматически сдвигает спектр вверх на величину $f_s/4$ (где f_s – частота сэмплирования входного сигнала АЦП) [6]. Сплошная линия соответствует отклику фильтра HB1 при сдвиге частоты на $f_s/4$. Пунктирные линии соответствуют теоретическому случаю для варианта, когда фильтр не работает в зоне Найквиста. Из рисунка видно, что отклик фильтра не может распространяться за пределы границы Найквиста (от 0 до $f_s/2$).

Следует отметить, что полоса частот фильтра HB1 остаётся неизменной и при наличии блока преобразования комплексного сигнала в вещественный, и при его отсутствии. Разница между этими двумя случаями соответствует сдвигу частоты на $f_s/4$, в результате чего центральная частота смещается в зону Найквиста. При отсутствии CRC-блока будет возникать по 38,5% зоны Найквиста, как для комплексной, так и для действительной составляющих сигнала. В случае использования CRC-блока комплексная составляющая трансформируется, и на реальную часть будет приходить 77% зоны Найквиста. Таким образом, блок преобразования комплексного сигнала в вещественный повлиял только на сдвиг частоты $f_s/4$, однако в результате преобразования коэффициент децимации стал равным единице. Частота сэм-

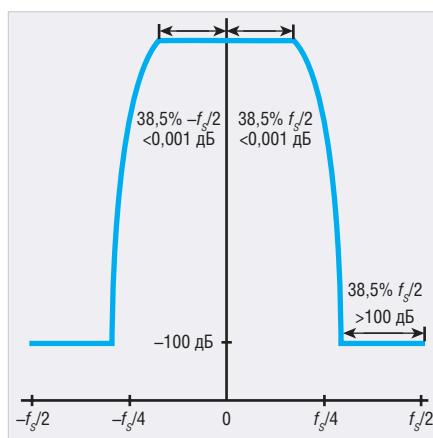


Рис.10. Пример отклика на выходе фильтра HB1

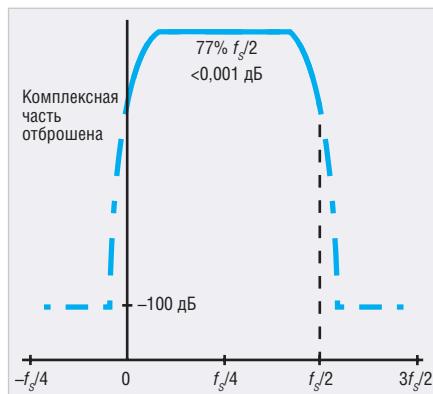


Рис. 11. Отклик фильтра HB1 при включённом блоке преобразования комплексного сигнала в вещественный

плирования f_s осталась прежней, но вместо полной полосы частот остаётся только 77% от зоны Найквиста.

Представляет практический интерес вопрос влияния эффекта наложения частот на отклик фильтра. Для начала следует рассмотреть только вещественную часть диаграммы. На рисунке 12 приведён пример влияния эффекта наложения частот на отклик фильтра HB1 (вещественная часть). Сплошная синяя линия соответствует отклику фильтра HB1 на реальный сигнал. Пунктирная линия показывает влияние эффекта наложения на отклик фильтра HB1.

Поскольку гармоники входного сигнала АЦП во 2-й, 3-й, 4-й и т.д. зонах Найквиста вызывают эффект наложения в первой зоне Найквиста, отклик фильтра HB1 показывает его реакцию на алиасинг именно в этих зонах. Так, например, сигналы на частоте $3f_s/4$ будут вызывать эффект алиасинга в первой зоне Найквиста в районе $f_s/4$. Важно понимать, что отклик фильтра HB1 всегда находится только в первой зоне Найквиста, поэтому отклик фильтра на частотные наложения в других зонах также будет располагаться в первой зоне Найквиста.

Рассмотрим, как влияет алиасинг на отклик фильтра при различных значениях коэффициента децимации. Обратимся к примеру ЦППЧ, в котором задействованы два фильтра HB1 и HB2. Отклик фильтров для этого случая показан на рисунке 13. При использовании комбинации фильтров HB1+HB2 коэффициент децимации будет равен 2. Отклик комбинации фильтров HB1+HB2 на реальный сигнал показан синей сплошной линией. Центральная частота полосы пропускания фильтра равна $f_s/4$. В результате работы фильтров HB1+HB2 полоса частот уменьшилась до 38,5% от зоны Найквиста. Сигнал, который появляется в зоне $7f_s/8$ будет вызывать наложение частот в первой зоне Найквиста на частоте $f_s/8$. В то же время гармоника $5f_s/8$ вызовет наложение в первой зоне Найквиста на частоте $3f_s/8$. Этот пример с группой фильтров HB1+HB2 легко можно распространить на случаи группы фильтров HB1+HB2+HB3 и HB1+HB2+HB3+HB4. Следует учитывать, что фильтр HB1 не может быть «прозрачным», в отличие от фильтров HB2, HB3 и HB4.

Теперь рассмотрим, как ведёт себя комплексная часть сигнала при различных конфигурациях ЦППЧ в АЦП AD9680. В качестве примера влияния

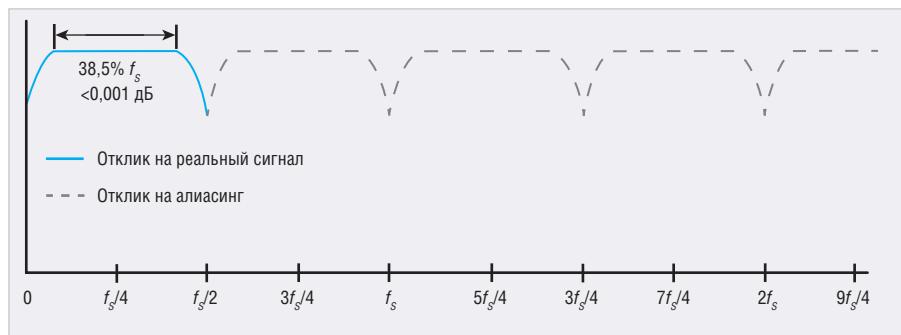


Рис. 12. Пример влияния эффекта наложения частот входного сигнала АЦП на отклик фильтра HB1 (вещественная часть)



Рис. 13. Пример влияния эффекта наложения частот входного сигнала АЦП на отклик комбинации фильтров HB1+HB2, DCM=2 (вещественная часть)

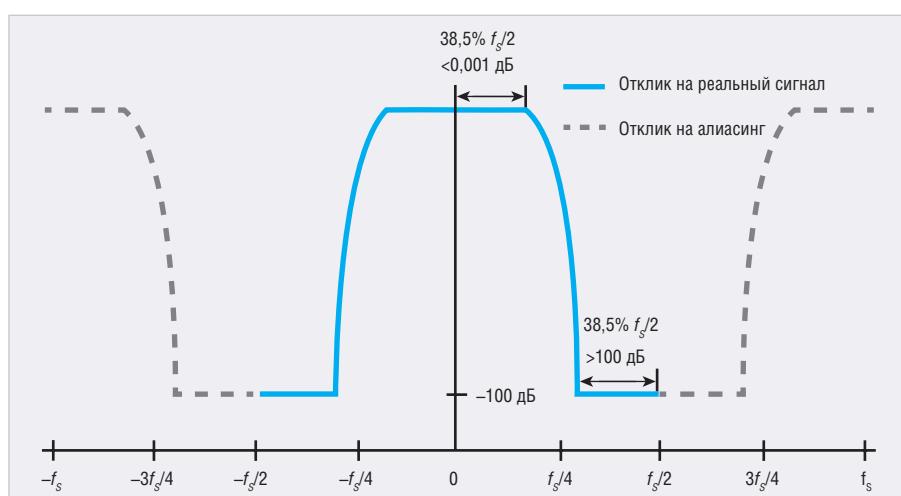


Рис. 14. Пример влияния эффекта наложения частот входного сигнала АЦП на отклик фильтра HB1 (коэффициент децимации 2, комплексный сигнал)

эффекта наложения на рисунке 14 показан аппроксимированный вид кривой отклика фильтра HB1. В данном примере предполагается, что ЦППЧ сконфигурирован таким образом, чтобы на его выходе был комплексный сигнал, содержащий действительную часть (I – синфазный канал) и минимую часть (Q – квадратурный канал).

Вернёмся к рисунку 10, на котором представлены действительные и минимые части отклика фильтра HB1. Следует напомнить, что в действительной

области в процентном отношении от ширины реальной зоны Найквиста HB1 имеет полосу пропускания 38,5%, полосу задерживания – 38,5%, переходную полосу – 23%. В минимой части на долю полосы пропускания и полосы задерживания приходится по 38,5%, что в сумме составляет 77% от комплексной зоны Найквиста. Переходная полоса в комплексной области занимает 23%.

Сплошная синяя линия на рисунке 14 соответствует фактическому отклику фильтра. Пунктирной синей линией

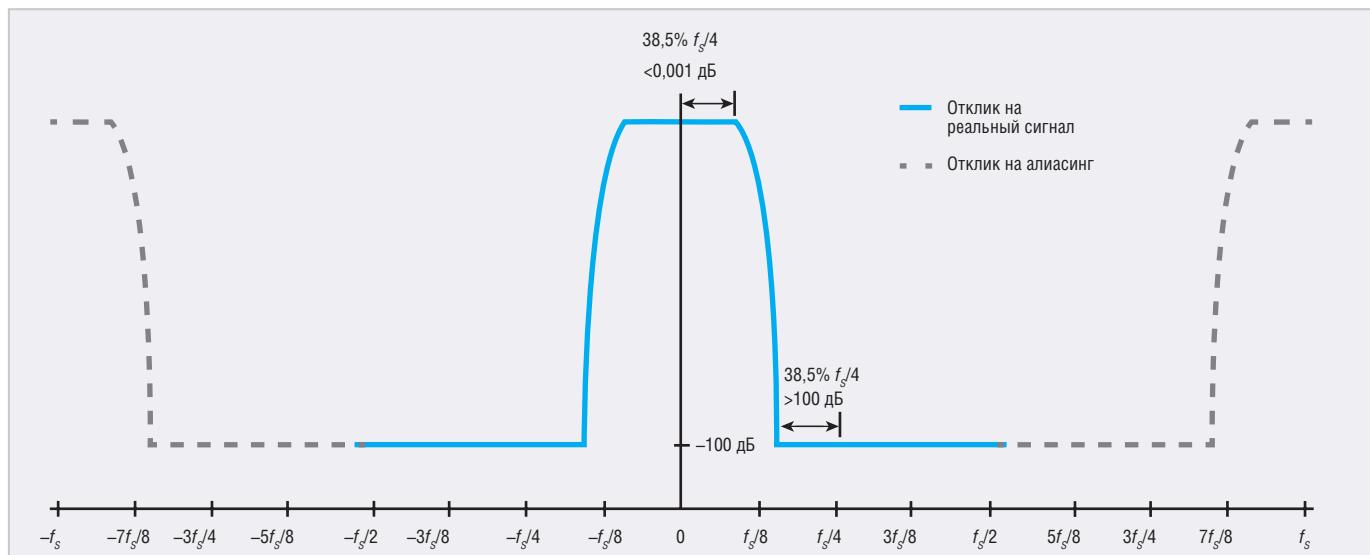


Рис. 15. Пример влияния эффекта наложения частот входного сигнала АЦП на отклик группы фильтров HB1+HB2 (коэффициент децимации 4, комплексный сигнал)

Характеристики ЦППЧ для АЦП AD9680 при различных схемах включения фильтров децимации

Конфигурация	Коэффициент децимации	Частота сэмплирования на выходе	Коэффициент децимации	Частота сэмплирования на выходе	Полоса, защищённая от эффекта наложения	Улучшение отношения сигнал/шум, дБ
		комплексный сигнал		реальный сигнал		
HB1	2	$0,5 \times f_s$	1	f_s	$0,385 \times f_s$	1
HB1+HB2	4	$0,25 \times f_s$	2	$0,5 \times f_s$	$0,1925 \times f_s$	4
HB1+HB2+HB3	8	$0,125 \times f_s$	4	$0,25 \times f_s$	$0,09625 \times f_s$	7
HB1+HB2+HB3+HB4	16	$0,0625 \times f_s$	8	$0,125 \times f_s$	$0,048125 \times f_s$	10

изображён слаженный отклик фильтра на эффект наложения частот. Для входного сигнала на частоте $7f_s/8$ алиасинг будет наблюдаться в полосе пропускания фильтра в первой зоне Найквиста на частоте $f_s/8$. В мнимой области для отрицательной частоты $-7f_s/8$ эффект наложения будет проявляться в отрицательной области полосы пропускания $-f_s/8$. На рисунке 15 показано влияние эффекта наложения при включении группы фильтров HB1+HB2 с коэффициентом децимации 4. Сплошной синей линией изображён реальный отклик фильтра. Пунктирная линия соответствует эффекту алиасинга. При совместной работе обоих фильтров HB1+HB2 доступная полоса пропускания составляет 38,5% от зоны Найквиста в действительной и мнимой областях (38,5% от $f_s/4$). В этом случае эффект наложения будет проявляться для частоты $15f_s/16$ в первой зоне Найквиста в районе $f_s/16$. В мнимой области отрицательная частота $-15f_s/16$ накладывается на другие частоты в мнимой области Найквиста со значением $-f_s/16$. Для случаев совместной работы фильтров HB3+HB4 эпюры будут аналогичны приведённым на рисунке 15.

Зачем же нужна децимация, и какие преимущества даёт эта операция? Одна из целей децимации заключается в

увеличении отношения сигнал/шум в полезной области полосы пропускания. Помимо этого, использование децимации приводит к уменьшению полосы пропускания при работе с интерфейсом JESD204B. Для ряда приложений такой подход позволяет использовать более дешёвые ПЛИС.

В таблице приведены характеристики АЦП с ЦППЧ AD9680 при различных схемах включения фильтров децимации. Одновременное использование всех четырёх фильтров HB1+HB2+HB3+HB4 позволяет улучшить скорость обработки и увеличить соотношение сигнал/шум на 10 дБ.

Как было показано на примере АЦП AD9680, при использовании фильтров децимации существует ряд преимуществ. В частности, в зависимости от приложения ЦППЧ может работать с действительными или комплексными выходными сигналами.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТЛАДОЧНЫХ СРЕДСТВ VIRTUAL EVAL ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АЦП

Новое программное обеспечение AD Virtual Eval предназначено для анализа работы отдельных узлов АЦП. Это ПО позволяет моделировать различ-

ные режимы работы фильтров, усилителей, преобразователей и других элементов без использования непосредственно АЦП. Таким образом, не имея самого физического АЦП, разработчик может имитировать работу различных моделей и выбирать наиболее оптимальный вариант, соответствующий конкретной задаче. Пользователь AD Virtual Eval имеет возможность моделировать в режиме онлайн конкретные АЦП с использованием сервера Analog Devices и работать с различными типами АЦП, включая высокоскоростные АЦП, прецизионные и специализированные преобразователи. ПО позволяет моделировать спектры в различных точках АЦП при заданных пользователем параметрах. Данное программное обеспечение находится в свободном доступе на сайте разработчика [7].

Рассмотрим как результаты реальных измерений AD9680 согласуются с модельными расчётами, выполненными с помощью AD Virtual Eval.

После выбора модели открывается главное окно программы, позволяющее работать с симулятором. Программа позволяет также вывести на экран блок-схему исследуемого АЦП, которая соответствует технической документации и информирует пользователя о конфигурации и основных блоках устройства (см. рис. 16). На данном этапе выбираются основные параметры АЦП, такие как частота и амплитуда входного сигнала, тактовая частота, наличие ЦППЧ, частота сэмплирования, которая в приведённом примере составляет 500 МГц.

На следующем этапе выбираются параметры для работы Virtual Eval в режиме имитации анализатора спек-

тра. На рисунке 17 показано окно программы Virtual Eval с параметрами, которые необходимо ввести для выполнения имитации FFT. В данном примере выбраны следующие значения: тактовая частота – 491,52 МГц, частота входного сигнала – 150 МГц, ЦППЧ включён с частотой генератора, установленной на 155 МГц. Для входа АЦП установлено значение «Реальное», преобразование с комплексным режимом (C2R) отключено, скорость децимации ЦППЧ – 4, коэффициент усиления – 6 дБ. Такой коэффициент усиления в ЦППЧ выбран для того, чтобы компенсировать потерю 6 дБ из-за процесса смешивания в преобразователе. Таким образом, ЦППЧ настроен для реального входного сигнала и сложного выходного сигнала с коэффициентом децимации 4.

Программа Virtual Eval позволяет моделировать шумы и нелинейные искажения только в раздельных режимах. На рисунке 17 показаны результаты моделирования шумов. Результаты эмуляции нелинейных амплитудно-частотных искажений также выводятся в отдельном окне. Модельные расчёты, проведённые с помощью Virtual Eval, дают следующие значения шумовых параметров: соотношение сигнал/шум – 71,953 дБ полной шкалы (dBFS), динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих (SFDR), – 69,165 дБн. Если допустить, что отклик базовой частоты отсутствует, то значение SFDR будет составлять 89,978 дБ, что соответствует величине 88,978 дБн, приведённой к –1 дБ полной шкалы входной мощности.

С помощью меню в Virtual Eval можно задавать множество параметров, позволяющих анализировать различные варианты работы АЦП, выбирать оптимальные диапазоны рабочих частот и контролировать наличие желаемой частоты в выходном спектре. Так, например, варьируя параметры работы АЦП, можно моделировать различные варианты положения основной частоты и соответствующих гармоник на выходе ЦППЧ. Такой подход делает процесс разработки значительно проще и эффективнее, чем использование только аппаратных средств.

Результаты фактических измерений комплексного сигнала на выходе ЦППЧ преобразователя AD9680-500, полученные с помощью VisualAnalog™, показаны на рисунке 18 [8]. Основная частота расположена на уровне –4,94 МГц. Мнимая часть основной частоты находится на

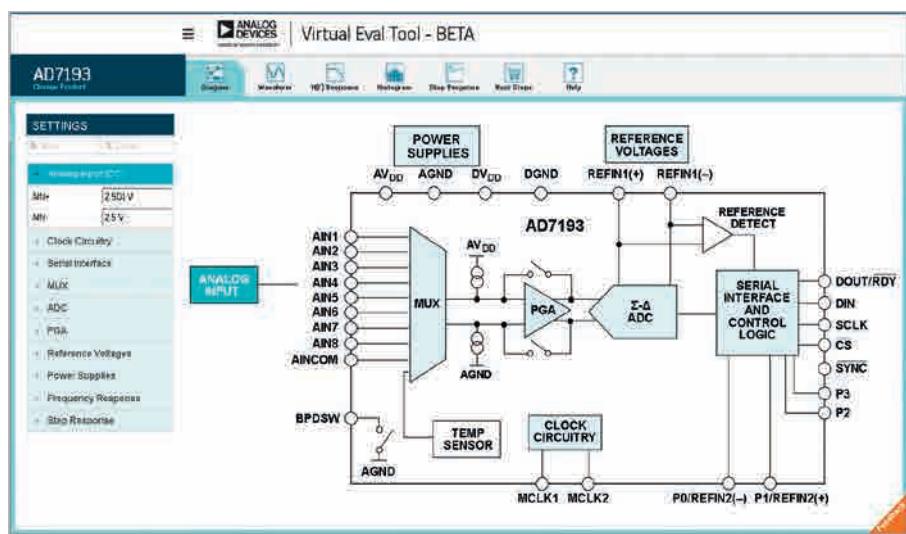


Рис. 16. Окно программы Virtual Eval с блок-схемой исследуемого АЦП

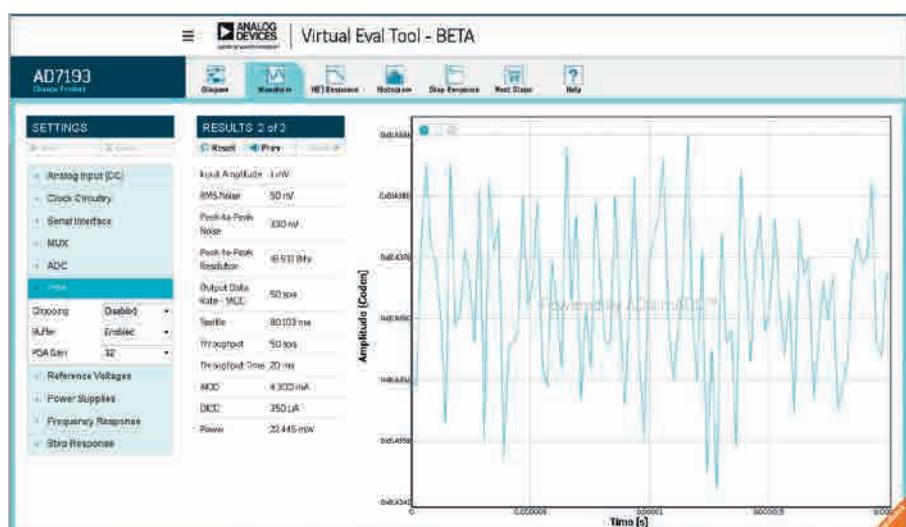


Рис. 17. Окно программы Virtual Eval для ввода базовых параметров

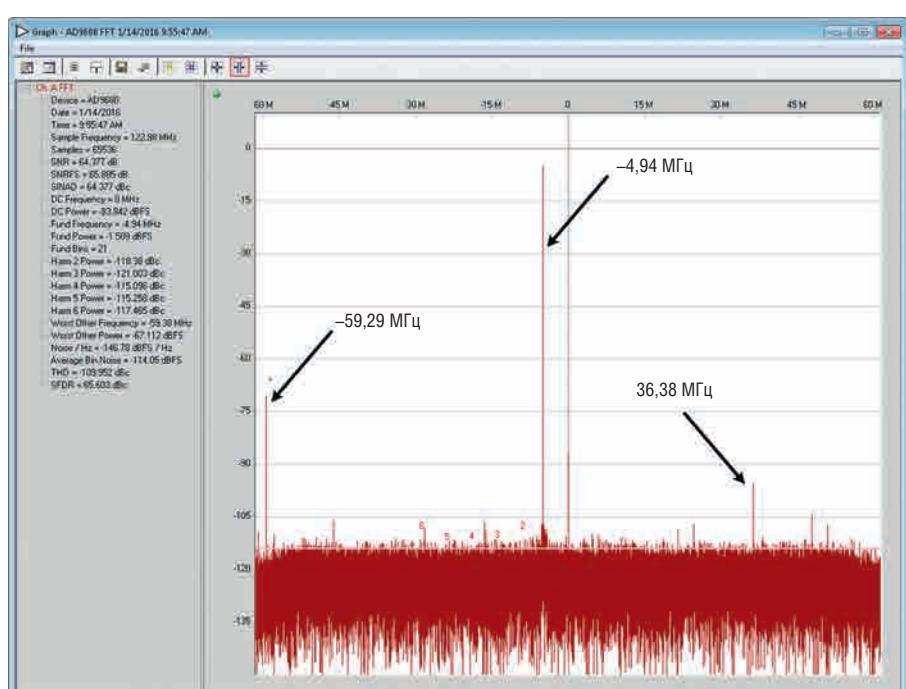


Рис. 18. Результаты фактических измерений комплексного сигнала на выходе ЦППЧ преобразователя AD9680-500, полученные с помощью VisualAnalog™

-59,28 МГц с амплитудой -67,122 дБ полной шкалы. Это означает, что в мнимой части за счёт фильтров децимации наблюдается ослабление примерно на 66 дБ.

Вторая гармоника находится на частоте 36,38 МГц и ослаблена примерно на 10 дБ. Третья гармоника отфильтрована до уровня шума измерения.

Необходимо отметить, что программа Virtual Eval не учитывает базовую частоту при расчётах соотношения сигнал/шум. Поэтому для того чтобы получить правильное значение, при настройке параметров работы с VisualAnalog™ необходимо исключить базовую частоту из результатов прямых измерений, выполненных с помощью анализатора спектров. Идея заключается в том, чтобы при выборе оптимального диапазона базовая частота не попала в выходной спектр.

Значение соотношения сигнал/шум, полученное с помощью прямых измерений, составляет 71,602 дБ полной шкалы. Это значение достаточно близко к результату модельных расчётов, выполненных с помощью программы Virtual Eval, - 71,953 дБ. Экспериментальное значение SFDR, равное 91,831 дБн, также хоро-

шо согласуется с расчётым значением 88,978 дБн.

В заключение можно сказать, что отладочные средства VisualAnalog™, FTT и Virtual Eval предоставляют пользователям уникальную возможность точно го моделирования поведения АЦП при использовании различных параметров и режимов работы [9]. В частности, в случае использования АЦП с встроенным ЦПЧ, таких, например, как AD9680, AD9690, AD9691 и AD9684, перечисленные программные средства позволяют разработчику получать эпюры базовых частот, их гармоник, а также конфликтующих частот в реальном и комплексном виде и выбирать такой режим работы, при котором нежелательные частоты будут находиться вне пределов рабочего диапазона, насколько это возможно.

Поскольку агрегация несущих и прямое радиочастотное преобразование становятся всё более популярными в самых различных областях науки, техники, медицины и производства, отмеченные выше инструменты могут оказаться крайне полезными при разработке новейших образцов широкополосного оборудования.

Точное предсказание поведения АЦП, а также возможность создания реального частотного плана позволяют эффективно использовать отладочные средства AD в таких приложениях, как, например, военное и гражданское радиолокационное оборудование, системы наведения и контроля траектории, автоматические системы управления транспортом и многие другие.

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.
6. Harris J. What's Up With Digital Downconverters. Part 2: www.analog.com.
7. Virtual Eval Tool – BETA: www.analog.com
8. Harris J. What's Up With Digital Downconverters: www.allaboutcircuits.com.
9. Jayamohan U. ADC Modeling Tools Speed Up Evaluation: www.analog.com



Новое поколение GaN-транзисторов

Wolfspeed

CGHV14250
Диапазон частот: 1200–1400 МГц
Мощность: 250 Вт
Коэффициент усиления: 18 дБ

CGHV14500
Диапазон частот: 1200–1400 МГц
Мощность: 500 Вт
Коэффициент усиления: 17 дБ

CGHV35150
Диапазон частот: 2900–3500 МГц
Мощность: 150 Вт
Коэффициент усиления: 13,5 дБ

PROCHIP
POWERED BY PROSOFT

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА
(495) 232-2522 • INFO@PROCHIP.RU • WWW.PROCHIP.RU



ЗАО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА «ДОЛОМАНТ»

**РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО
ВЫСОКОНАДЕЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

100% РОССИЙСКАЯ КОМПАНИЯ



ЗАКАЗНЫЕ РАЗРАБОТКИ

Разработка электронного оборудования по ТЗ заказчика в кратчайшие сроки

- Модификация КД существующего изделия
- Разработка спецвычислителя на базе СОМ-модуля
- Конфигурирование модульного корпусированного изделия
- Сборка магистрально-модульной системы по спецификации заказчика
- Разработка изделия с нуля



КОНТРАКТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

**Контрактная сборка электроники уровней:
модуль / узел / блок / шкаф / комплекс**

- ОКР, технологические консультации и согласования
- Макеты, установочные партии, постановка в серию
- Полное комплектование производства импортными и отечественными компонентами и материалами
- Поддержание складов, своевременное анонсирование снятия с производства, подбор аналогов
- Серийное плановое производство
- Тестирование и испытания по методикам и ТУ
- Гарантийный и постгарантийный сервис