

## БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ СИГМА-ДЕЛЬТА АЦП ДЛЯ СИСТЕМ СВЯЗИ

В статье дано краткое описание принципов построения и характеристик быстродействующих сигма-дельта АЦП с непрерывным временем преобразования, выпускаемых компанией Analog Devices.



Abstract -

In article the short description of principles of construction and characteristics of high-speed sigma-delta analogue-to-digital converters with continuous time of the transformation (CTSD) produced by Analog Devices company are given.

### HIGH-SPEED SIGMA-DELTA ANALOGUE-TO-DIGITAL CONVERTERS FOR COMMUNICATION SYSTEMS

В. Макаренко

V. Makarenko

Для преобразования аналоговых сигналов в цифровые в беспроводных системах связи, портативном промышленном и медицинском оборудовании требуются высокопроизводительные АЦП с разрешением более 10 разрядов, работающие в широкой полосе частот и имеющие малое энергопотребление. До недавнего времени в качестве таких преобразователей чаще всего использовали конвейерные АЦП или АЦП поразрядного уравнивания. К недостаткам этих АЦП относятся необходимость применения сложного фильтра, ограничивающего спектр сигнала на входе, и сравнительно большое энергопотребление.

Сигма-дельта АЦП, работающие с дискретными отсчетами сигналов (Discrete-Time Sigma-Delta – DTSD), также достаточно широко используемые в таких системах, тоже требуют применения фильтра на входе, а их полоса рабочих частот, как правило, не превышает 2 МГц.

Эти факторы заставили разработчиков преобразователей с малой потребляемой мощностью, предназначенных для высокопроизводительных портативных систем, использовать

сигма-дельта АЦП, работающие с непрерывными сигналами и чаще всего называемые АЦП с непрерывным временем преобразования (Continuous-Time Sigma-Delta – CTSD). Хотя АЦП такого типа известны давно [1], в интегральном исполнении их стали выпускать только с 2008 года. Первыми компаниями, наладившими их промышленный выпуск, стали National Semiconductor (одноканальный ADC12EU050) и Analog Devices (одноканальный AD9261 и двухканальный AD9262).

Для того, чтобы АЦП мог работать с широкополосными сигналами, необходимо обеспечить высокую частоту дискретизации, а для уменьшения интермодуляционных искажений, вызванных эффектом наложения спектров (aliasing) при дискретизации, необходимо на входе преобразователя установить фильтр, ограничивающий полосу частот входного сигнала.

При дискретизации сигнала спектр исходного сигнала периодизируется [1, 2] и для исключения перекрытия спектров дискретизированного и аналогового сигналов (рис. 1) диа-

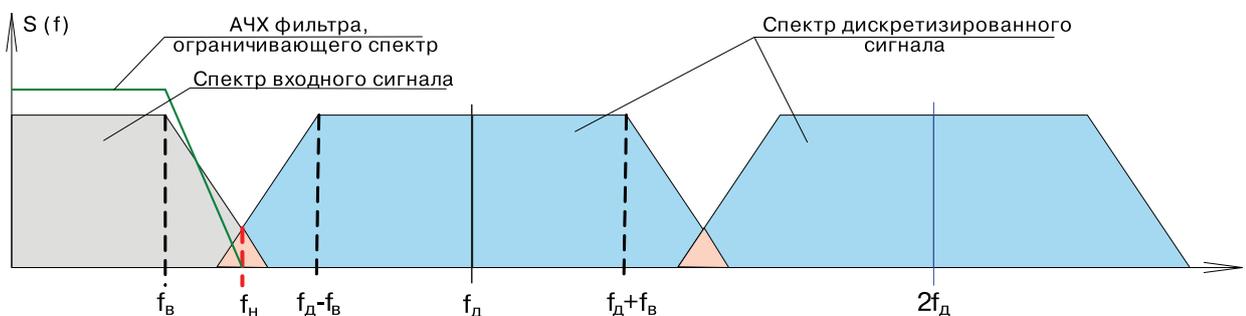


Рис. 1. Спектры входного и дискретизированного сигналов

пазон частот входного сигнала необходимо ограничить. Область перекрытия спектров на рис. 1 выделена розовым цветом. На частоте Найквиста ( $f_n$ ), равной половине частоты дискретизации ( $f_d$ ), необходимо обеспечить затухание аналогового сигнала, равное или большее, чем динамический диапазон АЦП. Для этого чаще всего используются фильтры нижних частот (ФНЧ) с частотой среза, равной верхней частоте ( $f_v$ ) спектра аналогового сигнала.

Чтобы упростить конструкцию фильтра, нужно увеличить частоту дискретизации в несколько раз в сравнении с минимальной, определяемой теоремой Котельникова  $f_d \geq 2f_v$ . К тому же, чтобы входной сигнал не вызывал перегрузки сигма-дельта модулятора по крутизне, значение  $f_n$  тоже должно быть выбрано значительно больше верхней частоты сигнала. Такой выбор частоты дискретизации получил название передискретизации, а отношение  $f_{\text{мод}}/f_d = K$  – коэффициента передискретизации. В этом отношении  $f_{\text{мод}}$  – значение повышенной частоты дискретизации.

Другой положительный эффект передискретизации состоит в том, что ошибки амплитудного квантования (шум дробления), распределенные по всему спектру квантуемого сигнала, при повышении частоты дискретизации распределяются в более широкой полосе частот, так что на долю основного сигнала приходится меньшая мощность шума. Каждое удвоение частоты дискретизации снижает уровень шума квантования на 3 дБ.

Сформированную на выходе модулятора двоичную последовательность необходимо преобразовать в двоичный код заданной разрядности (меньшей, чем в полученной при передискретизации выборке). Простейший способ – использовать счетчик фиксированной разрядности  $M$  и передавать на выход АЦП только один из  $2^M$  отсчетов [3].

Операция сокращения числа отсчетов (прореживания выборки) называется децимацией. В реальных сигма-дельта АЦП вместо двоичных счетчиков используют цифровые фильтры-дециматоры нижних частот с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтры). Как правило, передаточная функция таких фильтров (в частотной области)

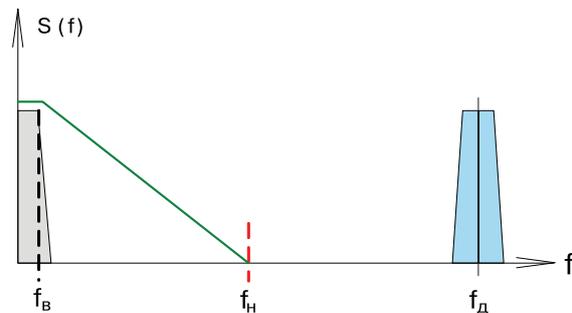
имеет вид [3]

$$H(f) = \frac{\sin(\pi f D / f_{\text{мод}})}{D \cdot \sin(\pi f / f_{\text{мод}})},$$

где  $D$  – коэффициент децимации, равный  $f_{\text{мод}}/f_d$ .

Коэффициенты передискретизации  $K$  и децимации  $D$  однозначно связаны, однако в реальных АЦП программируемым (изменяемым) параметром является только коэффициент децимации  $D$  при фиксированном значении тактовой частоты модулятора  $f_{\text{мод}}$ .

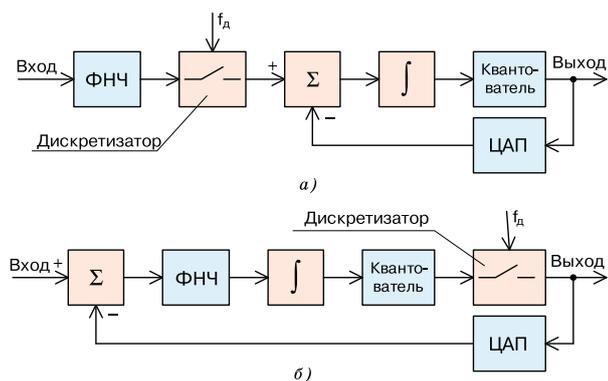
Спектры входного и дискретизированного сигналов при использовании передискретизации показаны на рис. 2. Как видно из рисунка, крутизна спада АЧХ входного ФНЧ благодаря разнесению в частотной области верхней частоты входного сигнала и частоты Найквиста может быть уменьшена в  $K$  раз, что позволяет значительно упростить этот фильтр.



**Рис. 2. Спектры входного и дискретизированного сигналов при использовании передискретизации**

Прежде, чем рассматривать преимущества CTSD АЦП, необходимо представить себе основные отличия преобразователей с DTSD- и CTSD-архитектурой. На рис. 3 приведены упрощенные структурные схемы [4] сигма-дельта модуляторов, являющихся основой этих видов АЦП, содержащих кроме модулятора выходной цифровой фильтр.

В схеме рис. 3, а ФНЧ, ограничивающий спектр входного сигнала, является внешним устройством. Работа этой схемы основана на вычитании из входного дискретизированного сигнала напряжения, формируемого на выходе ЦАП. Полученная разность напряжений интегрируется, а затем преобразуется в код параллельным АЦП малой разрядности (от 1 до 9 разрядов). В простейшем случае, показанном на рисунке, выходной одноразрядный код фор-



**Рис. 3. Упрощенные структурные схемы сигма-дельта модуляторов с DTSD- (а) и CTSD-архитектурой (б)**

мируется с помощью квантователя, в качестве которого используется компаратор. Выходной код преобразуется с помощью ЦАП в последовательность прямоугольных импульсов фиксированной длительности и амплитуды, которые подаются на инвертирующий вход сумматора. Если сигнал на входе модулятора превысит значение предыдущего отсчета на некоторое пороговое значение, он кодируется 1, если уменьшится – 0. Такая обработка требует достаточно больших значений частоты дискретизации, как правило, в 20-40 раз больше ширины полосы, занимаемой сигналом [3], во избежание искажений при быстром изменении амплитуды входного сигнала.

Порядок модулятора определяется числом интеграторов и сумматоров в его схеме. Сигма-дельта модуляторы  $N$ -го порядка содержат  $N$  сумматоров и  $N$  интеграторов и обеспечивают большее отношение сигнал/шум, чем модуляторы первого порядка, при той же частоте отсчетов. Примером сигма-дельта модулятора высокого порядка является ИМС AD7720 – одноканальный сигма-дельта модулятор седьмого порядка, выпускаемый компанией Analog Devices.

В модуляторе с CTSD-архитектурой (рис. 3, б) на вход сумматора подается аналоговый сигнал, из которого вычитается сигнал обратной связи. Это дает возможность включить аналоговый ФНЧ, ограничивающий спектр сигнала, между выходом сумматора и входом интегратора. Так как частота дискретизации выбирается в несколько десятков раз выше минимальной, необходимой по теореме Котельникова, то ФНЧ получается простым и может быть реали-

зован с составе ИМС АЦП. Разностный сигнал интегрируется, квантуется по уровню (преобразуется в параллельный код) и дискретизируется. Сигнал обратной связи формируется с помощью ЦАП.

По сравнению с модулятором, построенным по DTSD-архитектуре, в модуляторах с CTSD-архитектурой благодаря наличию аналогового фильтра между выходом сумматора и входом интегратора значительно снижены уровни комбинационных искажений высших порядков, вызванные эффектом наложения спектров входного и дискретизированного сигналов. Кроме того, благодаря высокой частоте дискретизации значительно уменьшается время преобразования и отпадает необходимость в использовании устройства выборки-хранения, которое зачастую требуется для эффективной работы модулятора с DTSD-архитектурой.

Рассмотрим структурную схему двухканального сигма-дельта АЦП AD9262 (рис. 4), выпускаемого компанией Analog Devices [5].

В состав АЦП входит сигма-дельта модулятор (СТ  $\Sigma$ - $\Delta$  модулятор), реализованный по структурной схеме, показанной на рис. 3, б. Для ограничения спектра входного сигнала используется ФНЧ пятого порядка. Квантователь обеспечивает 9 уровней квантования. Дискретизация входного сигнала осуществляется с максимальной частотой  $f_{\text{мод}} = 640$  МГц, что обеспечивает коэффициент передискретизации, равный 32, для сигнала с верхней частотой 10 МГц. Верхняя частота входного сигнала определяется простым соотношением  $f_{\text{в}} = f_{\text{мод}} / 64$ .

Сигналы управления дискретизатором (с частотой  $f_{\text{мод}}$ ), цифровым фильтром и преобразователем частоты дискретизации формируются встроенным синтезатором, построенным на основе системы ФАПЧ. Синтезатор содержит встроенный генератор, управляемый напряжением (ГУН). Парафазный сигнал опорной частоты подается на вход синтезатора со входов CLK+ и CLK- через встроенный драйвер. Если отсутствует источник парафазного сигнала тактовой частоты, можно использовать схему подключения однофазного сигнала, приведенную на рис. 5.

Для подключения LVPECL-логики в [4] рекомендуется использовать драйверы серии

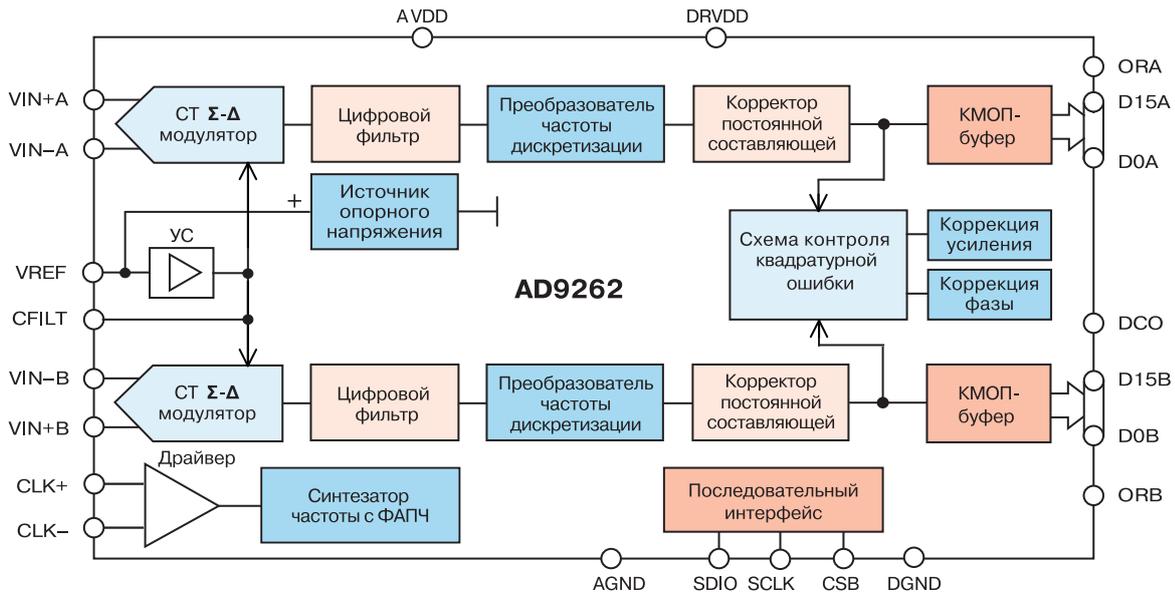


Рис. 4. Структурная схема двухканального сигма-дельта АЦП с архитектурой CTSD

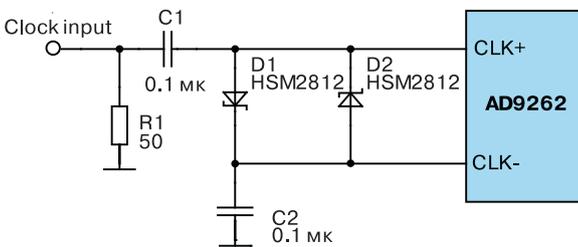


Рис. 5. Схема подключения однофазного генератора тактовых сигналов к AD9262

AD951x. Подробнее о способах согласования схем дифференциальной логики различных типов можно узнать в [6].

Встроенный источник опорного напряжения обеспечивает стабилизацию режима работы АЦП по постоянному току. Для минимизации уровня шумов между выводом VREF и общим проводом рекомендуется включать конденсатор емкостью 10 мкФ. При использовании внешнего источника опорного напряжения (например, ADR130B) внутренний источник отключается программно через последовательный интерфейс.

Цифровой фильтр осуществляет фильтрацию и децимацию сигнала, формируемого на выходе сигма-дельта модулятора. В ИМС предусмотрена возможность переключения полосы пропускания фильтра: 10, 5 и 2.5 МГц. На выходе фильтра частота выборок понижается с 640 до 40 МГц. Параметры фильтра программируются через последовательный интерфейс [5].

Преобразователь частоты дискретизации (Sample Rate Converter) позволяет привести в соответствие частоту отсчетов на выходе цифрового фильтра с параметрами узла, принимающего цифровой поток данных, формируемый AD9262. Для этого в преобразователе осуществляется интерполяция и повторная дискретизация с требуемой частотой. Диапазон скоростей цифрового потока на выходе преобразователя частоты от 20 до 168 Мбит/с. На рис. 6 показана частотная характеристика цифрового фильтра при полосе пропускания 10 МГц и скорости выходного потока на выходе преобразователя частоты 160 Мбит/с.

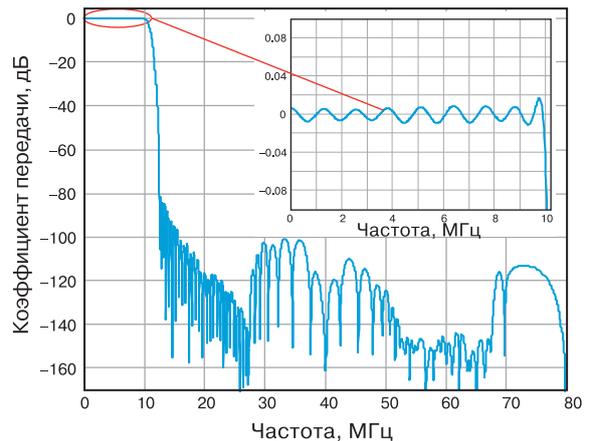


Рис. 6. Частотная характеристика цифрового фильтра при установленной полосе пропускания 10 МГц и скорости выходного потока 160 Мбит/с

В приемниках прямого преобразования или в других системах с квадратурной модуляцией несовпадение амплитуд и фаз действительной и мнимой частей квадратурных сигналов приводит к смещению спектра в область отрицательных частот, т.е. к развороту спектра. Это эквивалентно появлению интермодуляционных составляющих в низкочастотной области спектра. Еще более опасно это явление для систем связи со многими несущими, т.к. может привести к возникновению интерференции сигналов между каналами с различными несущими. Для исключения этого необходимо, чтобы в обоих каналах АЦП запаздывание фазы и коэффициент усиления были одинаковыми. Для поддержания усиления и фазового сдвига в заданных пределах предназначена схема контроля и коррекции квадратурной ошибки. В схеме анализируются фазовые и амплитудные соотношения составляющих  $I$  и  $Q$  квадратурного сигнала и вводится необходимая коррекция коэффициента усиления и фазового сдвига.

Корректор постоянной составляющей предназначен для компенсации сдвига постоянных составляющих квадратурного сигнала. Если в приемниках прямого преобразования постоянные составляющие квадратурных сигналов различны, то это приводит к появлению постоянной составляющей на выходе преобразователя частоты либо к возникновению низкочастотных флуктуаций, если уровни постоянных составляющих изменяются во времени. В системах связи или устройствах, в которых наличие фазовых и амплитудных рассогласований сигналов в разных каналах и разных постоянных составляющих в этих сигналах неопасны, системы коррекции могут быть отключены программно.

Выходные сигналы АЦП формируются в виде 16-разрядного двоичного кода (выводы D0...D15) и сигнала синхронизации с тактовой частотой (вывод DCO – Digital Clock Output). Выходной сигнал может формироваться в уровнях логики с напряжением питания 3.3 В или 1.8 В. На вывод питания DRVDD необходимо подавать соответствующее напряжение питания – 3.3 или 1.8 В.

Для согласования АЦП с источником однофазного сигнала рекомендуется [5] использовать ИМС типа ADA4937-2 –сдвоенный дифференциальный драйвер для АЦП, как показано на рис. 7.

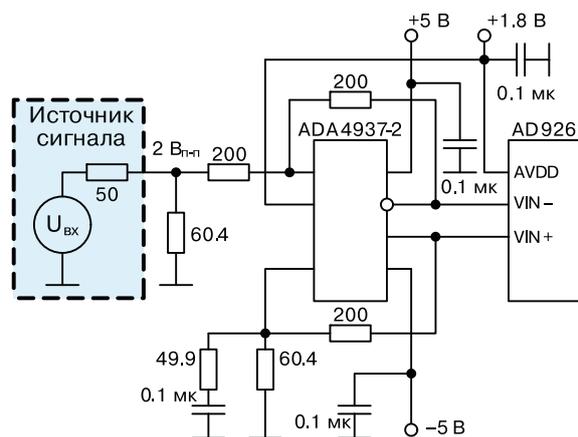


Рис. 7. Схема согласования АЦП AD9262 с источником однофазного сигнала

Основные параметры АЦП AD9262:

- разрешающая способность 16 бит
- отсутствие пропусков кода
- отношение сигнал/шум 83 дБ на частоте входного сигнала 10 МГц
- динамический диапазон, свободный от паразитных компонент (SFDR), 87 дБ на частоте входного сигнала 10 МГц
- входное сопротивление 1 кОм
- потребляемая мощность 600 мВт, в энергосберегающем режиме – 10 мВт, в спящем режиме – 3 мВт
- напряжение питания аналоговой части – 1.8 В, выходных каскадов цифровой части 1.8 или 3.3 В
- переключаемая полоса частот обрабатываемого сигнала 10, 5 или 2.5 МГц
- диапазон изменения скорости выходного потока данных 30...160 Мбит/с
- диапазон рабочих температур от -40 до 85 °С
- интегрированные в ИМС ЦАП, схема коррекции амплитуды и фазы квадратурных составляющих сигнала, синтезатор частоты для формирования тактового сигнала, источник опорного напряжения
- последовательный интерфейс управления SPI.

Более подробно с информацией об особенностях работы отдельных узлов AD9262 и его параметрами можно ознакомиться в [5].

На рис. 8, 9 приведены зависимости спектра и динамического диапазона выходного сигнала AD9262 от параметров входного сигнала.

Как видно из этих рисунков, шумовые и дискретные составляющие спектра спадают с высокой скоростью на 20 дБ на частотах, превышающих 2.5 МГц. Это объясняется тем, что встроен-

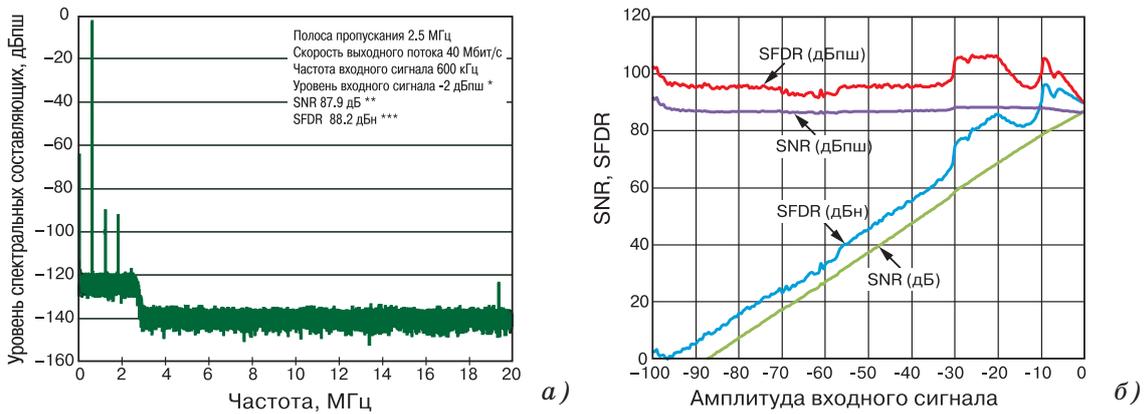
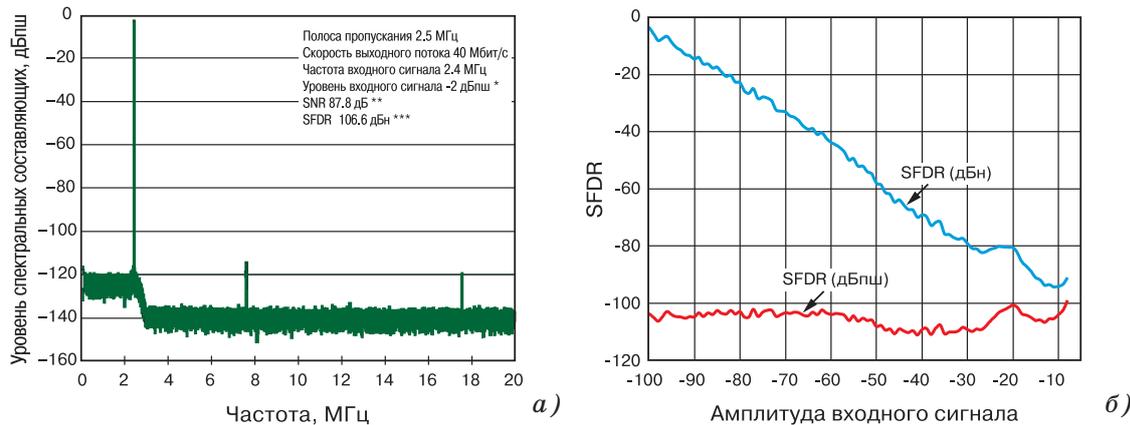


Рис. 8. Спектр выходного сигнала (а) и зависимость отношения сигнал/шум от амплитуды входного сигнала (б) AD9262 при частоте входного сигнала 600 кГц в полосе 2.5 МГц



**Примечания:**

- \* дБпш – дБ от полной шкалы (dBFS – dB Full Scale).
- \*\* SNR – отношение сигнал/шум.
- \*\*\* SFDR – динамический диапазон, свободный от паразитных компонент.

Рис. 9. Спектр выходного сигнала (а) и зависимость отношения сигнал/шум от амплитуды входного сигнала (б) AD9262 при частоте входного сигнала 2.4 МГц в полосе 2.5 МГц

ный цифровой фильтр АЦП в этом режиме имеет частоту среза 2.5 МГц. Графики зависимостей спектра сигнала и динамического диапазона при других параметрах входного сигнала и другой полосе пропускания фильтра можно найти в [5].

Подводя итоги, можно отметить, что благодаря высокой частоте преобразования, большому отношению сигнал/шум и сравнительно малой потребляемой мощности (практически вдвое меньшей, чем в обычных АЦП с аналогичным динамическим диапазоном) CTSD АЦП AD9261 и AD9262 могут найти применение в системах цифровой радиосвязи, работающих в различных стандартах. Помимо средств радиосвязи и телекоммуникаций новые АЦП могут использоваться в медицинском, измерительном и промышленном оборудовании, а также в системах телеметрии.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Стил Р. Принципы дельта-модуляции: Пер. с англ. / Под ред. В.В. Маркова. – М.: Связь, 1979. – 368 с.
2. Игнатъев Н.К. Дискретизация и ее приложения. – М.: Связь, 1980. – 264 с.
3. Шахнович И. Сигма Дельта АЦП: Архитектура, принципы, компоненты // Электроника НТБ, выпуск № 4, 2006 г.
4. Chabrak Karim. System Simulation of the Analog and Digital Front-End for Reconfigurable Multi-Standard Wireless Receivers // Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultat der Universitat Erlangen-Nurnberg, April 2006.
5. [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD9262.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD9262.pdf).
6. [http://www.kit-e.ru/articles/plis/2004\\_1\\_56.php](http://www.kit-e.ru/articles/plis/2004_1_56.php).