

ОПТИМИЗАЦИЯ ШУМОВЫХ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ

Часть 3. Выбор наилучшего преобразователя при заданном бюджете шумов

СТИВ ЭДВАРДС (STEVE EDWARDS), главный технический специалист, Maxim Integrated, russia-feedback@maximintegrated.com

Это третья и последняя из серии статей, посвященных шумам в сигнальных цепях. В первой статье «Шум в полупроводниках – предотвратим или неизбежен?» (см. ЭК10, 2013) были определены источники и характеристики шумов, обнаруживаемых во всех интегральных схемах, и было объяснено, в каком виде данные о шуме приводятся в технической документации. Мы также выяснили, как можно оценить шум на выходе источника опорного напряжения в реальных условиях эксплуатации, не оговоренных в документации. Во второй статье «Шумы и искажения в преобразователях данных» (см. ЭК11, 2013) мы акцентировали внимание на источниках шума и искажений, присущих преобразователям данных. Было также показано, в каком виде приводятся данные по шуму в технической документации на подобные приборы. В этой статье мы объединим информацию из первых двух публикаций. Кроме того, будет показано, как, имея заданный бюджет шумов, выбрать наиболее подходящий преобразователь данных.

ШУМ В СИГНАЛЬНОЙ ЦЕПИ

Начнем с краткого обзора концепций, рассмотренных в первой статье серии. Шум — нежелательное явление для любой электрической системы. В зависимости от происхождения его можно классифицировать как внешний (интерференция, помеха) или внутренний (внутренне присущий, неотъемлемый). На рисунке 1 все внешние источники шума объединены в один внешний источник шума V_{ext} , а все внутренние — в один внутренний источник шума V_{int} .

Бюджет шумов (noise budget) — это распределение источников шума в сиг-

нальной цепи, при котором обеспечивается приемлемое отношение сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR) на выходе. По определению, SNR — это отношение среднеквадратичного значения сигнала в диапазоне полной шкалы к суммарному среднеквадратичному значению шумов. Следовательно, для определения приемлемого распределения источников шума в сигнальной цепи необходимо оценить их влияние на общую величину SNR. Для этого следует познакомиться с двумя уникальными параметрами преобразователей данных, приводимыми в специфика-

циях: отношение сигнал/(шум + искажения) (Signal-to-Noise and Distortion Ratio, SINAD) и эффективное число битов (Effective Number of Bits, ENOB).

ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/(ШУМ + ИСКАЖЕНИЯ)

Чтобы учесть искажения, для преобразователей данных определение SNR было расширено. При этом используется специальный термин — отношение сигнал/(шум + искажения). К учитываемым искажениям относятся все нежелательные спектральные компоненты, за исключением постоянного напряже-

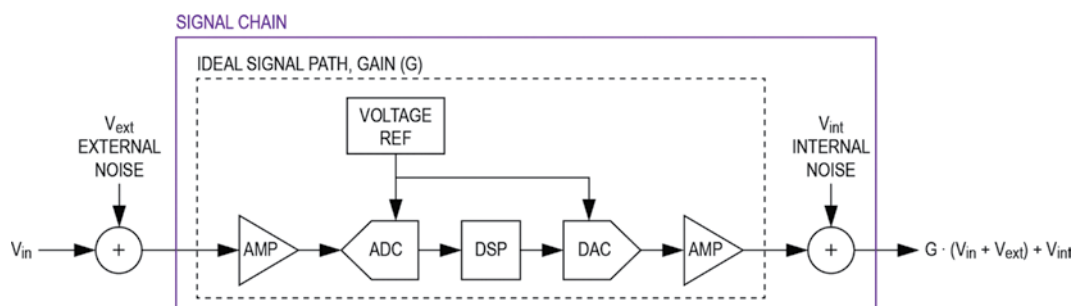


Рис. 1. Шум в сигнальной цепи

Signal chain — сигнальная цепь; Ideal Signal Path, Gain G — идеальный путь прохождения сигнала, усиление G; External Noise — внешний шум; Internal Noise — внутренний шум; AMP — усилитель; ADC — АЦП; DAC — ЦАП; Voltage Ref. — ИОН (источник опорного напряжения)

$$\text{SINAD} = -20 \log \left[\underbrace{\frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{\frac{\text{BW}}{100} (1 + \text{DNL})}}{2^N} \right)^2}_{\text{Шум квантования}} + \underbrace{\left(2\pi \frac{T_j}{10^6} \right)}_{\text{Шум, вызванный джиттером тактового сигнала}} + \underbrace{\left(\frac{2\sqrt{2}V_n}{2^N} \right)}_{\text{Аналоговый шум}} + \underbrace{\left(\frac{\text{THD}}{100} \right)}_{\text{THD}} \right] \text{ [dBFS]} \quad (1)$$

Рис. 2. Расчет SINAD

N — разрешение (разрядность) в битах; DNL — средняя дифференциальная нелинейность, LSB (в младших значащих битах); BW — отношение рабочей полосы частот к полной полосе (до частоты Найквиста), %; T_j — отношение среднеквадратичной величины джиттера периода дискретизации к периоду синусоидального сигнала, ppm (в миллионных долях); V_n — аналоговый шум, LSB_{RMS}; THD — полный коэффициент гармоник, %

ния (DC). SINAD — это отношение среднеквадратичного значения сигнала в диапазоне полной шкалы к среднеквадратичной сумме всех компонент шума и искажений.

SINAD можно выразить через шум квантования, дрожание апертуры (sample jitter), аналоговый шум и полный коэффициент гармоник (THD) (см. рис. 2):

При $\text{BW} = 100\%$; $\text{DNL} = 0 \text{ LSB}$; $T_j = 0 \text{ PPM}_{\text{RMS}}$; $V_n = 0 \text{ LSB}_{\text{RMS}}$; $\text{THD} = 0\%$ выражение для SINAD сводится к хорошо известному уравнению:

$$\text{SNR} = 6,02N + 1,76 \text{ дБ, [LSBRMS]}. \quad (2)$$

Приведенные выше параметры при указанных значениях описывают идеальный преобразователь данных, в котором имеется только присущий самому процессу дискретизации шум квантования при полной полосе пропускания. В этом случае $\text{ENOB} = N$ бит.

ЭФФЕКТИВНОЕ ЧИСЛО БИТОВ

Эффективное число битов (Effective Number of Bits — ENOB) — это мера, позволяющая оценить способность аналого-цифрового (АЦП) или цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) конвертировать сигнал из аналогового вида в цифровой или из цифрового в аналоговый. ENOB представляет собой динамическую характеристику АЦП

и является эквивалентом параметра SINAD.

ENOB и SINAD связаны следующим соотношением:

$$\text{ENOB} = \frac{\text{SINAD} - 10 \log \left(\frac{3}{2} \right)}{20 \log 2}, \text{ бит}. \quad (3)$$

ENOB означает такую разрядность преобразователя, при которой уровень шумов и искажений эквивалентен уровню шумов и искажений идеального преобразователя. Под идеальным здесь понимается преобразователь с полной полосой частот и разрядностью, равной ENOB, но не имеющий источников шума и искажений. Число ENOB всегда меньше или равно разрядности (N) характеризующего им устройства. Не следует путать ENOB с точностью по постоянному току, которая определяется только разрешающей способностью (N) и нелинейностью (INL) преобразователя.

КАЛЬКУЛЯТОР ENOB

Для ускорения расчетов шумов в преобразователях данных предназначена бесплатная программа-калькулятор Effective Number of Bits Calculator (ENOB Calculator). Чтобы загрузить ее со страницы [1], следует щелкнуть ссылку и выбрать Effective Number of Bits (ENOB).

Программа ENOB Calculator входит в состав калькулятора HP50g, являюще-

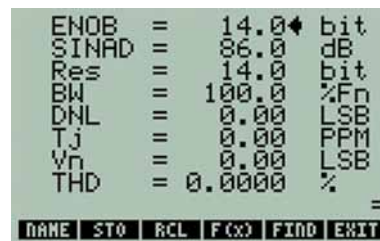


Рис. 3. Вид калькулятора ENOB

гося средством анализа и разработки схем применения АЦП и ЦАП. В программу можно ввести или рассчитать с ее помощью любой шумовой параметр. Калькулятор ENOB (см. рис. 3) можно также запускать на персональных компьютерах с ОС Windows®, используя бесплатную программу HPUserEdit 5.4 на сайте [2] или на странице калькулятора.

В калькуляторе ENOB используются приведенные выше уравнения (1) и (3) для расчета SINAD, а также уравнения для определения уровня шума, описанного во второй статье серии. Любой параметр можно ввести или найти, поэтому калькулятор полезен и при разработке, и при анализе. Программа ENOB Calculator будет использоваться далее для иллюстрации метода выбора наилучшего преобразователя при заданном бюджете шумов. Инструкции по работе с калькулятором можно найти в руководстве пользователя User's Guide (в архивном zip-файле вместе с калькулятором).

ВЫБОР НАИЛУЧШЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДАННЫХ ПРИ ИМЕЮЩЕМСЯ БЮДЖЕТЕ ШУМОВ

Бюджет шумов — приемлемое распределение источников шума в сигнальной цепи, которое дает желаемую величину SINAD. Лучше всего проиллюстрировать пошаговый метод выбора наиболее подходящего преобразователя при заданном бюджете шумов на конкретном примере. Чтобы ускорить процесс, будем проводить необходимые вычисления с помощью калькулятора ENOB Calculator.

ЦЕЛЬ

Выбрать наиболее подходящий АЦП, обеспечивающий $\text{SINAD} \geq 80 \text{ дБ}$ при работе в полосе частот 0–100 кГц в диапазоне полной шкалы входного сигнала (см рис. 4).

ШАГ 1. ВЫБОР РАЗРЕШЕНИЯ (РАЗРЯДНОСТИ)

Используя простейшее уравнение (4) для идеального преобразователя, найдем необходимое минимальное разрешение, позволяющее получить требуемую величину SNR:

$$\text{SNR} = 6,02N + 1,76 \text{ дБ}. \quad (4)$$

ЕЩЕ ОДИН ХОРОШИЙ КАЛЬКУЛЯТОР ДЛЯ СИГНАЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ

См. на странице [4] руководство по применению "Calculating the Error Budget in Precision Digital-to-Analog Converter (DAC) Applications" («Расчет погрешности в прецизионных схемах с ЦАП»), информация из которого в равной степени применима как к цифро-аналоговым, так и к аналого-цифровым преобразователям. В руководстве объясняется, как пользоваться разработанными для этого связанными таблицами (associated spreadsheets). Необходимо вводить значения в ячейки, выделенные синим цветом. В ячейки, выделенные красным цветом, выводятся результаты расчетов. С помощью этого инструмента можно, пользуясь спецификациями на компоненты, искать компромиссные решения, обеспечивающие при наименьшей себестоимости выполнение требований к системе. В руководстве используются данные, взятые из технической документации на реальные компоненты, и рассматриваются четыре разных проекта:

- Бытовые аудиоустройства в недорогих приложениях низкой точности.
- Высокоточное прецизионное лабораторное оборудование.
- Однократно калибруемое устройство с низким дрейфом, цифровой подстройкой смещения и усиления.
- Низковольтный портативный измерительный прибор среднего класса точности с батарейным питанием.

Чтобы упростить разработку, все проекты и связанные с ними решения по выбору комплектующих подробно описаны. Для сравнения с системами, в которых используются ЦАП другой разрядности, приведена таблица погрешностей, выраженных в миллионных долях.

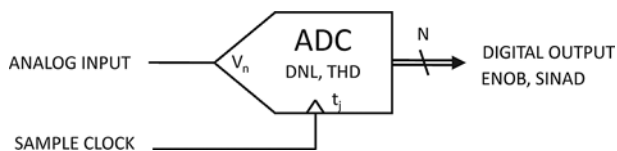


Рис. 4. АЦП с параметрами, описывающими источники шума

Analog Input — аналоговый вход; Digital Output — цифровой выход; Sample Clock — тактовый сигнал

```

ENOB = 13.0 bit
SINAD = 80.0 dB
Res = 13.0 bit
BW = 100.0 %Fn
DNL = 0.00 LSB
Tj = 0.00 PPM
Vn = 0.00 LSB
THD = 0.0000 %

```

Рис. 5. С помощью ENOB Calculator находим, что в нашем примере необходимо разрешение 13 бит

Выражая N, получаем:

$$N = \frac{\text{SNR} - 1,76}{6,02} \quad (5)$$

С помощью калькулятора ENOB Calculator находим согласно этому уравнению, что для SINAD величиной 80 дБ требуется разрешение 13 бит (см. рис. 5).

Выбираем разрядность 14 бит. Да, 14 бит, а не 13, поскольку у реальных АЦП значение SINAD ниже из-за таких факторов как DNL, T_j , V_n и THD, которые всегда больше нуля, что приводит к увеличению уровня шума. Введя в калькулятор значение 14 бит, найдем, что АЦП обеспечивает значение SINAD, равное 86 дБ (см. рис. 6).

Это значение больше требуемых 80 дБ, поэтому начнем поиск среди 14-бит АЦП.

ШАГ 2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ВЫБОР АЦП

Найдем 14-бит АЦП, который может работать с сигналами в диапазоне

```

ENOB = 14.0 bit
SINAD = 86.0 dB
Res = 14.0 bit
BW = 100.0 %Fn
DNL = 0.00 LSB
Tj = 0.00 PPM
Vn = 0.00 LSB
THD = 0.0000 %

```

Рис. 6. При ENOB = 14 бит значение SINAD составит 86 дБ

частот 0–100 кГц. Быстрый просмотр АЦП от Maxim Integrated даст множество 14-бит кандидатов. Для данного примера был взят АЦП MAX1062. Все требуемые параметры, приведенные в таблице «Электрические характеристики» в техническом описании на этот прибор см. на рисунке 7.

Параметры, относящиеся к нашему бюджету шумов, выделены красным цветом. Согласно документации, для этого АЦП типичны следующие значения: DNL = ±0,5 LSB, входной шум (V_n) = 0,32 LSB_{RMS}, THD = -99 дБ и дрожание апертуры (T_j) = 50 пс. В случае АЦП входной шум называют шумом переключения, поскольку этот параметр отражает неопределенность времени переключения между выходными смежными кодами.

ШАГ 3. РАСЧЕТ SINAD

Введем в калькулятор параметры из представленной выше таблицы электрических характеристик:

DNL = 0,5 LSB, THD = -99 дБ и $V_n = 0,32 \text{ LSB}_{\text{RMS}}$.

В ENOB-калькуляторе T_j определяется как отношение среднеквадратичного значения джиттера (T_j) тактового сигнала к периоду синусоидального сигнала полной шкалы, выраженное в миллионных долях (ppm):

$$T_j = \frac{t_j}{t_{in}} \cdot 10^6 \quad (6)$$

Значение T_j для наихудшего случая можно найти, разделив 50 пс (T_j) на самый короткий период входного сигнала (t_{in}), равный в этом примере 1/100 кГц, и умножив полученную величину на 106. Таким образом, $T_j = (50 \cdot 10^{-12} / 10 \cdot 10^{-6}) \cdot 10^6 \text{ ppm} = 5 \text{ ppm}$. Вводим в калькулятор $T_j = 5 \text{ ppm}$.

Калькулятор показывает, что значение SINAD уменьшилось до 80,1 дБ (см. рис. 8). АЦП MAX1062 обеспечивает требуемое (80 дБ) значение SINAD с запасом 0,1 дБ. Однако на практике необходим дополнительный запас, т.к. мы использовали приведенные в документации типовые значения, а не максимальные. Мы также не учитывали возможность наличия каких-либо дополнительных источников шума.

ШАГ 4. ПРОВЕРКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ШУМОВ

Прежде чем предпринимать меры по снижению шума, посмотрим на уровни шумов и искажений (см. рис. 9), чтобы понять, где и что можно улучшить. Видно, что наибольший вклад в общую величину шума и искажений вносит шум квантования. Его можно снизить, увеличив разрешение (разрядность).

ШАГ 5. СНИЖЕНИЕ ШУМА КВАНТОВАНИЯ

Дополнительный запас по допустимому уровню шума можно получить,

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(AVDD = DVDD = +4.75V to +5.25V, fSCLK = 4.8MHz (50% duty cycle), 24 clocks/conversion (200ksps), VREF = +4.096V, TA = TMIN to TMAX, unless otherwise noted. Typical values are at TA = +25°C.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
DC ACCURACY (NOTE 1)						
Resolution			14			Bits
Relative Accuracy (Note 2)	INL	MAX1062A			±1	LSB
		MAX1062B			±2	
		MAX1062C			±3	
Differential Nonlinearity	DNL	No missing codes over temperature		±0.5	±1	LSB
Transition Noise		RMS noise		±0.32		LSBRMS
DYNAMIC SPECIFICATIONS (1kHz sine wave, 4.096Vp-p) (Note 1)						
Total Harmonic Distortion	THD		-99		-86	dB
CONVERSION RATE						
Aperture Jitter			<50			ps
Sample Rate	fs	fSCLK / 24			200	ksps

Рис. 7. Шумовые параметры АЦП MAX1062

50% duty cycle — рабочий цикл 50%; 24 clocks/conversion — 24 такта на преобразование; $T_A = T_{\text{MIN}}$ to T_{MAX} , unless otherwise noted. Typical values are at $T_A = +25^\circ\text{C}$ — $T_A = T_{\text{MIN}} \dots T_{\text{MAX}}$, если не указано иное. Типовые значения даны при $T_A = 25^\circ\text{C}$; Parameter — параметр; Symbol — обозначение; Conditions — условия; Units — единицы измерения; DC Accuracy (Note 1) — точность по постоянному току (примечание 1); Resolution — разрешение; Relative Accuracy (Note 2) — относительная точность (примечание 2); Differential Nonlinearity — дифференциальная нелинейность; No missing codes over temperature — отсутствие пропущенных кодов во всем диапазоне температур; Transition Noise — шум переключения между смежными кодами; RMS noise — среднеквадратичное значение шума; Dynamic Specifications (1kHz sine wave, 4.096Vp-p) — динамические параметры (синусоида — 1 кГц, 4,096 Вp-p); Conversion Rate — скорость преобразования; Aperture Jitter — дрожание апертуры; Sample Rate — частота дискретизации

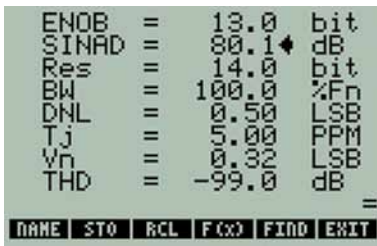


Рис. 8. Сейчас калькулятор показывает, что значение SINAD для MAX1062 равно 80,1 дБ

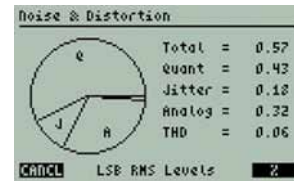
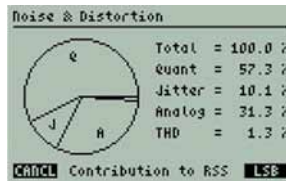


Рис.9. В калькуляторе ENOB распределение шумов представлено в графическом виде: в виде процентов от корня из суммы квадратов (RSS) или как среднеквадратичные значения LSB

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(AVDD = DVDD = +4.75V to +5.25V, fSCLK = 4.8MHz (50% duty cycle), 24 clocks/conversion (200kps), VREF = +4.096V, CREF = 4.7µF, TA = TMIN to TMAX, unless otherwise noted. Typical values are at TA = +25°C.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
DC ACCURACY (NOTE 1)						
Resolution			16			Bits
Relative Accuracy (Note 2)	INL	MAX1162A			±2	LSB
		MAX1162B			±2	
		MAX1162C			±4	
Differential Nonlinearity	DNL	No missing codes over temperature	MAX1162A	±0.5	±1	LSB
			MAX1162B	-1	±1.75	
		MAX1162C			±2	
Transition Noise		RMS noise		±0.65		LSBRMS
Total Harmonic Distortion	THD			-99	-90	dB
Aperture Jitter	tAJ			<50		ps
Sample Rate	fs	fSCLK / 24			200	kps

Рис. 10. Шумовые параметры АЦП MAX1162

50% duty cycle — рабочий цикл 50%; **24 clocks/conversion** — 24 такта на преобразование; **TA = TMIN to TMAX unless otherwise noted. Typical values are at TA = +25°C** — TA = TMIN...TMAX, если не указано иное. Типовые значения даны при TA = 25°C; **Parameter** — параметр; **Symbol** — обозначение; **Conditions** — условия; **Units** — единицы измерения; **DC Accuracy (Note 1)** — точность по постоянному току (примечание 1); **Resolution** — разрешение; **Relative Accuracy (Note 2)** — относительная точность (примечание 2); **Differential Nonlinearity** — дифференциальная нелинейность; **No missing codes over temperature** — отсутствие пропущенных кодов во всем диапазоне температур; **Transition Noise** — шум переключения между смежными кодами; **RMS noise** — среднеквадратичное значение шума; **Dynamic Specifications (1kHz sine wave, 4.096Vp-p)** — динамические параметры (синусоида — 1 кГц, 4,096 Вp-p); **Conversion Rate** — скорость преобразования; **Aperture Jitter** — дрожание апертюры; **Sample Rate** — частота дискретизации

выбрав 16-бит версию АЦП — MAX1162. Опять же, все требуемые параметры приведены в таблице электрических характеристик технического описания прибора (см. рис. 10).

Параметры, имеющие отношение к нашему анализу бюджета шумов, выделены красным цветом. Для параметров, величины которых в таблице не приведены, в качестве оценки возьмем типовые значения для 14-бит АЦП MAX1062. Введем в калькулятор следующие значения параметров для MAX1162 и найдем SINAD: N = 16 бит; DNL = 0,5 LSB; Tj = 5 ppm; Vn = 0,65 LSB_{RMS}; THD = -99 дБ.

Найденная для MAX1162 величина SINAD равна 86,5дБ (см. рис. 11), что на 6,5 дБ превышает требуемые 80 дБ.

Еще раз напомним, что для оценки SINAD MAX1162 использовались *типичные* значения шумовых параметров. На практике *действительная* величина SINAD может оказаться меньше. Оценить SINAD можно с более консервативных позиций, взяв максимальные значения тех параметров, для которых такие значения приведены в таблице.

ШАГ 6. ПЕРЕРАСЧЕТ SINAD

Давайте пересчитаем SINAD для MAX1162, но на этот раз будем использовать максимальные значения из таблицы электрических характе-

ристик. Данный шаг также поможет определить, не окажется ли SINAD для MAX1162 меньше требуемых 80 дБ при DNL и THD, соответствующих наихудшему случаю. Из технического описания следует, что в наихудшем случае DNL = ±1 LSB (max), а THD = -90 дБ (max). Введя эти значения в калькулятор, видим: N = 16 бит; DNL = 1,0 LSB; Tj = 5 ppm; Vn = 0,65 LSB_{RMS}; THD = -90 дБ.

Найденное значение SINAD составляет 84,7дБ (см. рис. 12). Таким образом, SINAD для MAX1162 на 4,7 дБ превышает требуемые 80 дБ.

ШАГ 7. ПОВТОРНАЯ ПРОВЕРКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ШУМОВ

Повторно рассматривая уровни шумов и искажений для наихудшего случая, мы видим, что все источники (квантование, дрожание апертюры, входной шум и нелинейные искажения) вносят примерно равный вклад в общий уровень шума. Обратите внимание, что здесь ни один источник нельзя однозначно объявить самым «шумным» (см. рис. 13).

Суммарный шум уменьшился на 40% — с 0,57 LSB_{RMS} при 14 бит до 1,35 LSB_{RMS} при 16 бит (что эквивалентно 0,34 LSB_{RMS} при 14 бит). Это снижение шума и дает увеличение значения SINAD.

ШАГ 8. КОМПРОМИССЫ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ ШУМОВ

Пока общий бюджет шумов не превышает заданной границы, его можно перераспределять между источниками



Рис. 11. SINAD для АЦП MAX1162 составляет 86,5 дБ

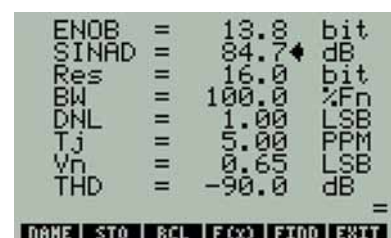


Рис. 12. При максимальных значениях DNL и THD значение SINAD для 16-бит АЦП MAX1162 составляет 84,7 дБ

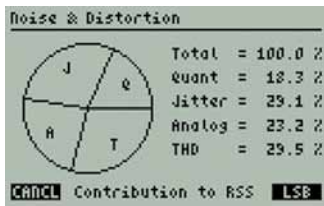


Рис. 13. Удобство графического представления очевидно при сравнении рисунков 8 и 12. Видно, что шум квантования значительно снизился

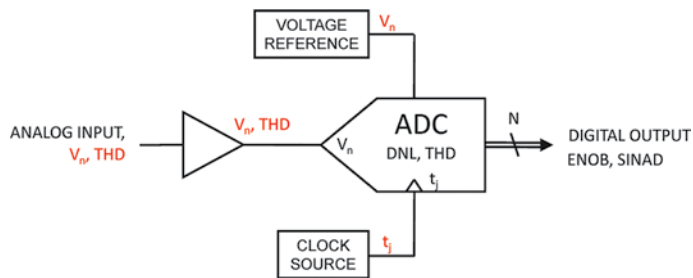


Рис. 14. Источники шума АЦП в сигнальной цепи

Voltage Reference — источник опорного напряжения; Analog Input — аналоговый вход; Digital Output — цифровой выход; Clock Source — источник тактового сигнала

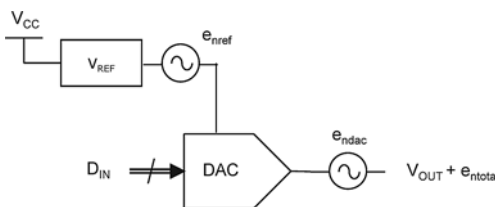


Рис. 15. Пример распределенных источников шума

шумов, присутствующими в сигнальной цепи (см. рис. 14).

Шум, вызванный джиттером тактового сигнала (T_j), и аналоговый шум (V_n) могут генерироваться источниками, внешними по отношению к преобразователю данных. Поэтому, хотя для выбранного АЦП эти параметры являются фиксированными, их можно улучшить, изменив внешние схемы, которые подключаются к АЦП. Например, можно применить внешние малошумящие входные усилители и источники опорного напряжения или внешнюю схему тактирования с меньшим джиттером.

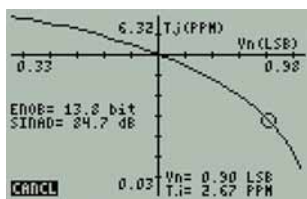


Рис. 16. Калькулятор ENOB позволяет сравнивать варианты выбора между величиной джиттера тактового сигнала и уровнем входного шума. Значения выводятся для указанного курсором предполагаемого компромиссного решения

КАК СУММИРОВАТЬ ШУМЫ ОТ НЕКОРРЕЛИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Шумы от некоррелированных источников суммируются геометрически, т.е. как корень квадратный из суммы квадратов:

$$e_{\text{ntotal}} = \sqrt{e_{n1}^2 + e_{n2}^2 + e_{n3}^2 + \dots + e_{nm}^2} \quad (7)$$

Часто одно слагаемое в геометрической сумме является доминирующим, т.е. существенно больше остальных слагаемых. Например, на рисунке 15 выходной шум складывается из шума источника опорного напряжения (e_{nref}) и шума ЦАП (e_{ndac}).

Общий уровень выходного шума представляет собой среднеквадратичную сумму e_{nref} и e_{ndac} , когда выход ЦАП настроен на работу в диапазоне полной шкалы:

$$e_{\text{ntotal}} = \sqrt{e_{nref}^2 + e_{ndac}^2} \quad (8)$$

Если $e_{nref} = 300 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$, а $e_{ndac} = 100 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$, то $e_{\text{ntotal}} = 316 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$.

Доля шума ЦАП в общем шуме составляет всего 16 $\text{нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$! Отсюда вывод: борясь с некоррелированными шумами, акцентируйте внимание на доминирующих слагаемых.

КОМПРОМИССНЫЕ РЕШЕНИЯ

С помощью калькулятора ENOB можно построить график, связывающий две любые переменные. Воспользуемся этой возможностью, чтобы определить, как должны быть связаны между собой джиттер тактового сигнала (T_j) и входной шум (V_n), чтобы при этом значение SINAD не менялось. С помощью курсора, принимающего форму окружности, на графике можно выбрать любую точку. При этом отображаются взаимосвязанные значения джиттера и входного шума (см. рис. 16).

Положение курсора на рисунке 16 показывает возможный компромисс между V_n и T_j , при котором SINAD остается равным 84,7 дБ. Из рисунка следует, что при увеличении V_n до 0,9 LSB для сохранения величины SINAD, равной 84,7 дБ, джиттер тактового сигнала необходимо уменьшить до 2,67 ppm.

И, наконец, существует еще один полезный инструмент, позволяющий рассчитывать суммарные погрешности в приложениях с АЦП и ЦАП. Более подробную информацию см. во врезке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье было показано, что для определения характеристик системы при наличии шума квантования, джиттера тактового сигнала, нелинейности канала и источников шума, отнесенных ко входу и выходу, можно использовать типичные и максимальные значения этих параметров, приводимые в технической документации на АЦП и ЦАП. Была продемонстрирована пошаговая процедура выбора наиболее подходящего преобразователя при заданном бюджете шумов. Калькулятор ENOB помогает проанализировать влияние вышеуказанных параметров и предоставляет разработчикам конструктивные способы управления и снижения шумов от других элементов системы.

Для получения дополнительной информации обращайтесь к официальным дистрибьюторам Maxim Integrated в РФ [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. www.maximintegrated.com/tools/calculators/hp50g.
2. www.hpcalc.org.
3. www.maximintegrated.com/distributors.
4. www.maximintegrated.com/AN4300.
5. Behzad Razavi. Principles of Data Conversion System Design. IEEE Press. New York. 1995.
6. Franco Maloberti. Data Converters. Springer. Netherlands. 2008.
7. Maxim Integrated tutorial 4300. Calculating the Error Budget in Precision Digital-to-Analog Converter (DAC) Applications//www.maximintegrated.com/app-notes/index.mvp/id/4300.