ВЛИЯНИЕ ДЖИТТЕРА ТАКТОВОГО СИГНАЛА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ АЦП

АЛЕКСЕЙ МИХАЙЛОВ, *almix13@gmail.com*

Тактовый сигнал быстродействующего АЦП должен быть очень точным, чтобы не ухудшались характеристики преобразователя. В статье рассмотрены факторы, влияющие на величину джиттера.

В качестве примера рассмотрим 16-разрядный АЦП Linear Technology LTC2209, который производит 160 млн выборок в секунду. Отношение сигнал–шум равно 77,4 дБ; свободный от шума динамический диапазон составляет 100 дБ на большей части полосы пропускания.

В большинстве быстродействующих АЦП, в т.ч. в LTC2209, для хранения считанного значения амплитуды сигнала используется устройство выборки и хранения (УВХ). УВХ представляет собой конденсатор, подключенный ко входу через аналоговый ключ. При замыкании ключа происходит выборка, конденсатор заряжается до входного напряжения. При размыкании ключа это значение сохраняется.

Рис. 1. **Сравнение временной нестабильности для двух входных сигналов с разной частотой**

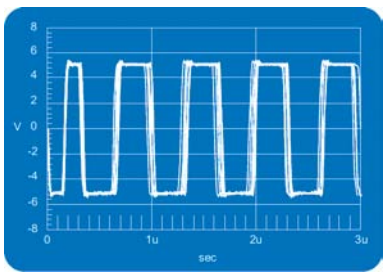

Рис. 2. **Неверный способ наблюдения смещения фронтов сигнала на осциллографе**

Временная нестабильность тактового сигнала называется погрешностью апертуры, или джиттером. Она возникает, когда моменты замыкания ключа наступают через неравные промежутки. Появляется напряжение ошибки, пропорциональное амплитуде и скорости изменения входного сигнала. Другими словами, чем больше частота и амплитуда входного сигнала, тем он более чувствителен к джиттеру тактового сигнала. Из рисунка 1 видно, что погрешность для сигнала с более высокой частотой больше.

Амплитудой джиттера называют величину смещения по времени. Она измеряется в единицах времени — долях секунды либо в интервальных единицах (unit interval, UI). Интервальной единицей называется отрезок времени, обратно пропорциональный частоте следования данных. Этот термин часто используется при исследованиях джиттера. UI определяется как минимальный номинальный временной интервал в выбранной схеме кодирования.

Частотой джиттера называют частоту, с которой происходит фазовый сдвиг. Как и в случае наложения шума или помехи, привносимый джиттером сигнал может быть синусоидальным, сложным колебанием или абсолютно случайным процессом.

ИЗМЕРЕНИЕ ДЖИТТЕРА

Джиттер цифрового сигнала можно увидеть по смещению импульсов относительно идеального тактового сигнала. На практике при измерении джиттера приходится опираться на сам сигнал, т.е. выявлять его смещения относительно себя же.

Простейшим и наиболее неудачным примером такого метода является наблюдение формы сигнала на осциллографе (см. рис. 2). К сожалению, полученный результат зависит от несовершенства генератора осциллографа и от спектра джиттера сигнала. Вместо джиттера на рисунке 2 показано интервальное отклонение. Между ними есть определенная связь, однако на некоторых частотах джиттер не виден вовсе, тогда как на других амплитуда джиттера может удвоиться, например, если речь идет о низкочастотном джиттере.

Для получения временной нестабильности следует подавать на вход АЦП идеальный тактовый сигнал с ФАПЧ. Такой способ самоуточнения сигнала аналогичен наложению ВЧ-фильтра с частотой среза, равной частоте среза ФАПЧ. Полученный идеальный тактовый сигнал можно использовать в качестве внешнего тактового сигнала осциллографа или как опорный сигнал при работе с двулучевым осциллографом.

Если в качестве тактового сигнала для осциллографа использовать опорный сигнал с ФАПЧ и установить временную развертку в один UI, множество следующих друг за другом импульсов отобразятся как один, накладываясь двух на друга из-за послесвечения точек люминофора экрана. Такая характерная картинка называется глазковой диаграммой. Степень раскрытия глаза зависит от смещения по времени фронтов импульса. Узость глазного просвета характеризует джиттер — чем меньше просвет, тем больше временная нестабильность.

На рисунке 1 серый прямоугольник обозначает область, за которую не должен заходить сигнал, иначе временная нестабильность превышает допустимый предел.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ДЖИТТЕР

Уровень джиттера нельзя оценивать отвлеченно, поскольку значения, недопустимо высокие для одних схем,

являются пренебрежимо малыми для других. Для производителя программируемых логических схем 30 и 50 пс — малый джиттер. В быстродействующих АЦП точность тактового сигнала не должна превышать 1 пс в зависимости от частоты входного сигнала. Строго говоря, определяющим фактором является распределение мощности по спектру оцифрованного сигнала, а не мощность сигнала на самой высокой частоте. Исключением является случай, когда сигнал максимален на верхней границе спектра. Приведем простой пример. Сигнал с равномерно распределенной мощностью в полосе 0–1 МГц на 6 дБ менее чувствителен к джиттеру, чем одночастотный сигнал с частотой 1 МГц и эквивалентной мощностью.

Источников временной нестабильности может быть несколько, начиная с резонаторов и делителей частоты до буферов тактового сигнала. Все паразитные наводки также вносят вклад.

Собственный внутренний джиттер LTC2209 равен 70 фс. Для того уровня быстродействия, который обеспечивает LTC2209 и остальные модели 16-разрядных АЦП Linear Technology при временной нестабильности 0,5 пс (это лучший показатель для большинства производителей) заметно ухудшается отношение сигнал–шум в некоторых схемах выборки. Таким образом, требования к джиттеру могут быть продиктованы не преобразователем, а принципом осуществления выборки.

Для всех АПЦ с отношением сигнал–шум 77 дБ при частоте входного сигнала 140 МГц максимальное значение этого отношения, заявленное в документации, обеспечивается при одном и том же уровне джиттера. Это объясняется просто: временная нестабильность зависит от частоты входного сигнала, а не тактового. В LTC2209 при джиттере 10 пс отношение сигнал–шум (SNR) уменьшается на 0,7 дБ при входном сигнале 1 МГц. На частоте 140 МГц отношение сигнал–шум уменьшится до 41,1 дБ.

На рисунке 3 показана зависимость отношения сигнал–шум LTC2209 от частоты входного сигнала при различных значениях джиттера. При временной нестабильности 100 пс отношение сигнал–шум начинает ухудшаться уже при частоте входного сигнала 200 кГц.

Теоретически зависимость отношения сигнал–шум от джиттера описывается формулой:

$$SNR = -20\lg(2\pi f_{вх}\sigma),$$

где $f_{вх}$ — частота входного сигнала; σ — среднеквадратичная временная нестабильность.

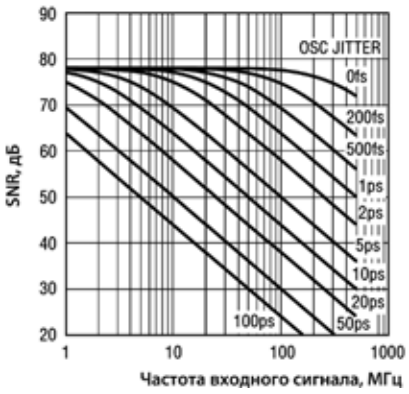

Рис. 3. **Зависимость отношения сигнал–шум LTC2209 от частоты входного сигнала при различных значениях джиттера**

Рис. 4. **Влияние фазового шума тактового сигнала на входной сигнал**

Мощность шума, вызванного временной нестабильностью, пропорциональна мощности входного сигнала. Например, если мощность входного сигнала –1 дБ при частоте 70 МГц, а джиттер составляет 1 пс, отношение сигнал–шум составит 68 дБ. При мощности сигнала –5 дБ отношение сигнал–шум уменьшается до 72 дБ.

Для получения величины, на которую уменьшается отношение сигнал–шум, сложим мощность джиттера и заявленное значение SNR:

$$\Delta SNR = 10\lg(10^{(-SNR_{АЦП}/10)} + 10^{(-SNR_{джиттера}/10)}).$$

Как правило, для характеристики тактовых генераторов используется спектральная плотность фазового шума, выраженная в дБс/Гц. Выходной сигнал генератора можно разложить на амплитудную и частотную составляющие:

$$V(t) = [V_0 + \varepsilon(t)]\sin(2\pi f_0 t + \varphi(t))$$

где ε(t) и φ(t) — шумовые напряжение и частота.

При измерении спектральной плотности предполагается, что амплитудная компонента шума ε(t) пренебрежимо мала по сравнению с фазовым шумом φ(t). Это допущение применимо к генераторам любого качества.

По определению, спектральная плотность L(f) есть отношение сигнала с одной боковой полосой фазового шума на полосе 1 Гц к мощности несущей. Проинтегрировав L(f), получим джиттер в полосе f1—f2:

$$\sigma = \frac{1}{2\pi f_o}\sqrt{\int_{f1}^{f2} 2L(f)df}.$$

Результат этого выражения не зависит от частоты.

Для большинства резонаторов указывается джиттер в полосе 12 кГц…20 МГц. Так сложилось исторически. За пределами этого диапазона характеристики могут кардинально отличаться. Это следует иметь в виду при выборе резонатора.

Для большинства генераторов, в которых фазовый шум, близкий к несущей, доминирует, большее значение имеет нижняя граница диапазона. Для практических вычислений более информативным параметром является спектральная плотность. Так, два генератора с разным спектральным составом могут иметь одинаковый джиттер при одинаковых пределах интегрирования. При этом их отношения сигнал–шум различаются.

Широкополосный шум на ВЧ может не влиять на временную нестабильность, однако уменьшает отношение сигнал–шум. Фазовый шум вблизи несущей размывает основной сигнал, за счет чего уменьшается динамический диапазон и отношение сигнал–шум за счет равномерного повышения порогового шума во всей зоне Найквиста.

Джиттер не влияет на свободный от шума динамический диапазон, если только тактовый сигнал не содержит выбросы. Нижний предел интегрирования соответствует минимальному частотному разрешению манипуляций оцифрованной выборки.

На рисунке 4 показан джиттер тактового сигнала в ограниченной полосе, соотнесенный с фазовой модуляцией двух сигналов одинаковой амплитудой и с разными частотами. Видно, что действие случайного фазового шума и фазовой модуляции тактового сигнала увеличивается в присутствии входного сигнала с более высокой частотой. Вход синхронизации АЦП следует рассматривать как вход для локального генератора, а не как сигнал цифрового управления. Все компоненты, присутствующие в тактовом сигнале, в т.ч. широкополосный шум до частот гигагерцового диапазона, смешиваются с входным сигналом.

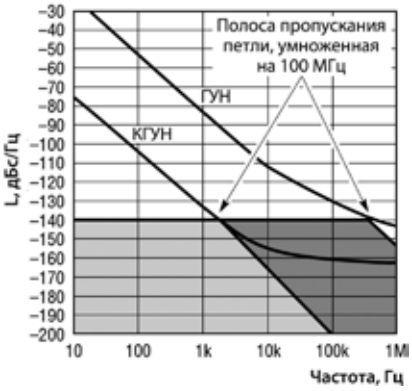

Рис. 5. **Сравнение типичной частотной зависимости фазового шума КГУН и ГУН**

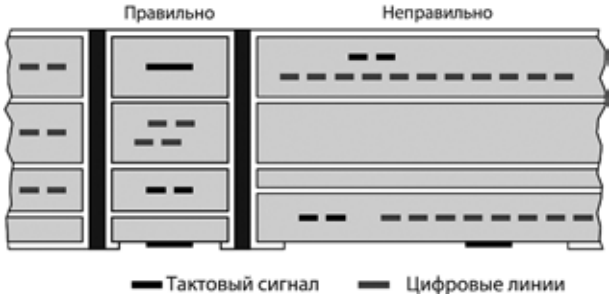

Рис. 6. **Правильное** (слева) **и неправильное** (справа) **расположение линии тактирования**

ДЖИТТЕР ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ПРИЛОЖЕНИЕМ, А НЕ АЦП

Приложения, в которых принимается слабый сигнал, находящийся очень близко к большим посторонним сигналам, например RFID, чувствительны к фазовому шуму вблизи несущей. Наоборот, когда оцифровывается выходной сигнал CCD, джиттер не влияет, поскольку в момент выборки скорость нарастания сигнала мала.

Для систем обработки видеосигнала фазовый шум вблизи несущей также не влияет на работу. Например, в HDTV окно выборки составляет примерно 6400 пс на пиксел. Еще одним классом устройств, нечувствительных к фазовому шуму вблизи несущей, являются высокоскоростные устройства передачи данных, для которых даже широкополосный фазовый шум незаметен.

Сигналы с высоким коэффициентом амплитуды (WCDMA OFDM) и нестандартным распределением мощности имеют низкую среднеквадратичную мощность, поэтому пороговый уровень шума не превышает амплитуду одного тона. В то же время при модуляции более высокого порядка, например QAM и ФМ, сигналы более подвержены шуму и имеют узкую полосу восстановления несущей для тех же скоростей передачи символов, что в CDMA.

В программно-определяемых приемопередатчиках требования к фазовому шуму также достаточно жесткие, поскольку вблизи информационного сигнала могут возникать сильные одночастотные помехи.

ВЫБОР ТАКТОВОГО ГЕНЕРАТОРА

Большинство генераторов вырабатывает фазовый шум, близкий к несущей, который ограничивает их динамический диапазон в этой области. Для его подавления используется контур ФАПЧ, который выступает как узкополосный фильтр слежения.

Полоса пропускания петли определяется генератором и, наоборот, генератор подбирается под желаемую полосу петли. Для кварцевого генератора, управляемого напряжением (КГУН), требуется очень узкая полоса, чтобы отслеживать стабильный опорный источник. Управляемые напряжением генераторы (ГУН) имеют широкий диапазон настройки, однако для них требуется более широкая полоса петли, иначе шум вблизи несущей окажется слишком большим.

Если настраиваемый диапазон частот мал, рекомендуется использовать кварцевый резонатор, управляемый напряжением. Когда диапазон составляет октаву, а шум вблизи несущей должен быть слабым, возникают сложности, особенно если коэффициент деления большой и в ФАПЧ сравниваются низкие частоты. На рисунке 5 приведено сравнение типичной частотной зависимости фазового шума КГУН и ГУН.

Оптимальная полоса пропускания контура ФАПЧ определяется точкой пересечения кривой плотности шума опорного генератора, умноженной на центральную частоту, и кривой фазового шума КГУН или ГУН. В приведенном примере это частота 2 кГц для КГУН и 300 кГц — для ГУН. Угловая частота 300 кГц, поэтому приходится сравнивать частоты не менее 3 МГц, а лучше рассчитывать с запасом (5 МГц).

Для приведенного примера можно выбрать КГУН с частотой сравнения 20 кГц. Если низкая опорная частота (коэффициент деления высок) используется в схеме с ГУН, точка пересечения располагается на более низкой частоте и временная нестабильность значительно увеличивается. Если полоса пропускания контура ФАПЧ и коэффициент умножения слишком малы, фазовый шум ГУН остается в полосе пропускания ФАПЧ. Если для конкретного приложения близкий к несущей шум не играет роли, можно использовать кварцевый резонатор.

Тактовый сигнал может ухудшиться, если он проходит через матрицу ПЛИС, в которой внутренние перекрестные помехи достаточно сильны. В ПЛИС могут возникать скачки общего потенциала. Если выходы ПЛИС тактируются с разной частотой, то эти скачки проявятся в тактовом сигнале и, в конечном счете, — на выходе АЦП, использующем этот же сигнал тактирования.

В качестве каскада восстановления синхронизации целесообразнее использовать малошумящие триггеры, чтобы не возникала временная нестабильность при делении частоты ГУН с помощью ПЛИС. В то же время ПЛИС можно использовать как узкополосный контур ФАПЧ для внешнего КГУН с внешним петлевым фильтром. Не рекомендуется применять схемы цифровой ФАПЧ для получения тактового сигнала для АЦП кроме случаев передискретизации.

Тактовый сигнал ухудшается также в случае, когда он проходит вдоль цифровых сигналов. Тактовый сигнал следует проводить только по медным проводникам и отверстиям. На рисунке 6 показаны примеры правильной и неправильной трассировки линии тактирования. Во втором случае тактовый сигнал проходит по тем же каналам, что и цифровые сигналы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Джиттер тактового сигнала оказывает определяющее влияние на характеристики АЦП. Он является функцией частоты входного сигнала, а не частоты выборки. Выбор тактового генератора определяется назначением приложения. Рекомендуется тщательно изучать характеристики, заявленные производителем. Выбранный тактовый генератор следует протестировать вместе с АЦП на отладочной плате, иначе могут возникнуть проблемы на более поздних стадиях проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Derek Redmayne и др. Understanding the Effect of Clock Jitter on High Speed ADCs.
2. www.eetimes.com.
3. www.dsplog.com.