

Оптимизация генератора тактовых импульсов в блоке аналого-цифрового преобразования

Боб Ридер, Уэйн Грин, Роберт Шилито
Перевод Алексея Власенко, alexey.vlasenco@analog.com.ru

Оптимизация системы генерации импульсов — задача не простая, но дающая хороший результат. Может быть относительно несложно разработать цифро-аналоговую схему с цифро-аналоговым преобразователем, в которой обеспечивался бы джиттер тактовых импульсов порядка 350 фс, но достаточно ли этого для современных быстродействующих систем? Например, при тестировании АЦП AD9446-100 (16 разрядов, 100 МГц) в режиме оцифровки из первой зоны Найквиста и частоте оцифровки 100 МГц джиттер величиной 350 фс может ухудшить соотношение сигнал/шум (SNR) примерно на 3 дБ. Если этот же преобразователь оцифровывает сигнал из 3-й зоны Найквиста (частота входного сигнала составляет 105 МГц), то ухудшение отношения сигнал/шум составит уже 10 дБ. Чтобы снизить величину джиттера до 100 фс или ниже, разработчик должен понимать, откуда берётся джиттер, а также какая величина джиттера является допустимой для данного случая. Может быть большим разочарованием обнаружить на поздней стадии разработки, что характеристики устройства ограничены величиной джиттера. Однако проблему можно предотвратить на стадии разработки.

Здесь мы разберём все относящиеся к делу спецификации тактовых сигналов и рассмотрим, как достичь необходимых параметров в системах с быстродействующими преобразователями сигналов. Начав с типичной схемы тактирования АЦП, показанной на рис. 1, мы продемонстрируем подходы, позволяющие оптимизировать тактовый сигнал в каждой точке сигнальной цепи, и укажем на некоторые распространённые приёмы проектирования, которых следует избегать.

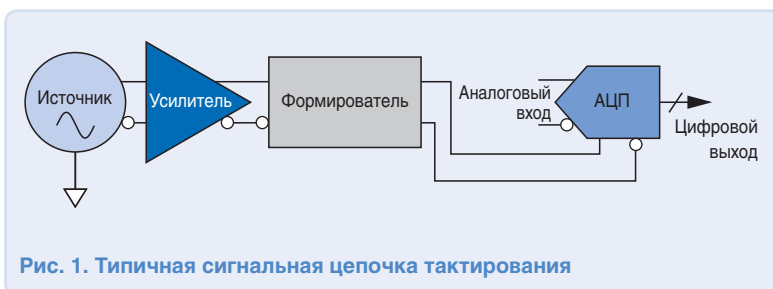


Рис. 1. Типичная сигнальная цепочка тактирования

ЧТО ТАКОЕ ДЖИТТЕР?

Джиттер — пожалуй, самый важный параметр, характеризующий схему генерации тактовых сигналов, поэтому важно рассмотреть некоторые основные теоретические положения и понять, что означают термины. Во многих технических статьях очень глубоко рассматривается теория джиттера. Однако помимо понимания того, что такое джиттер, для разработчика важно знать, откуда он берётся и как минимизировать влияние этих факторов.

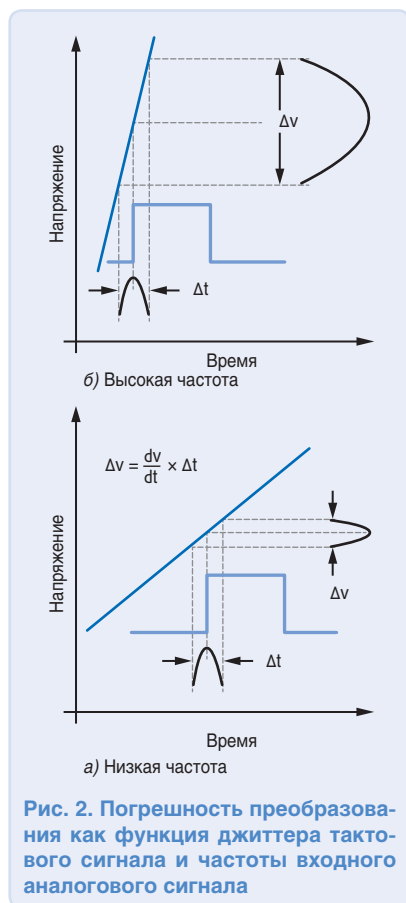


Рис. 2. Погрешность преобразования как функция джиттера тактового сигнала и частоты входного аналогового сигнала

Джиттер — это непостоянство положения фронта тактового импульса, погрешность временной характеристики, приводящая к погрешности оцифровки величины амплитуды (рис. 2 а). Повышение частоты аналогового входного сигнала приводит к увеличению скорости нарастания сигнала, а это влечет за собой увеличение погрешности преобразования (рис. 2 б). Обратите внимание, что амплитуда погрешности преобразования относительна: погрешность в 1/2 младшего разряда (LSB) для 10-разрядного преобразователя соответствует погрешности 32 LSB для 16-разрядного АЦП. Это означает, что джиттер становится всё более существенным фактором по мере увеличения частоты сигнала и разрядности АЦП.

Так как это соотношение интуитивно очевидно, инженер сможет оценить, какая величина джиттера будет приемлема, основываясь на разрядности АЦП и частоте сигнала. Уравнение 1 даёт величину отношения сигнал/шум (в дБ) в зависимости от частоты для идеального АЦП с бесконечной разрешающей способностью, а уравнение 2 — величину отношения сигнал/шум для идеального 10-, 12-, 14- и 16-разрядного АЦП.

$$\Delta \text{SNR}_{ideal} = 20_{10} \left[\frac{1}{2\pi f t_{jitter}} \right] \quad (1)$$

(см. диагональные линии на рис. 3).

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

(см. горизонтальные линии на рис. 3).

Рис. 3 иллюстрирует оба этих уравнения. Эта диаграмма позволит разработчику оценить величину джиттера, приемлемую для данной частоты входного сигнала. На низких частотах точность ограничена разрешающей способностью преобразователя. По мере повышения частоты достигается точка, где начинает доминировать суммарный джиттер системы. Для частот левее этой точки снижение величины джиттера ничего не даст.

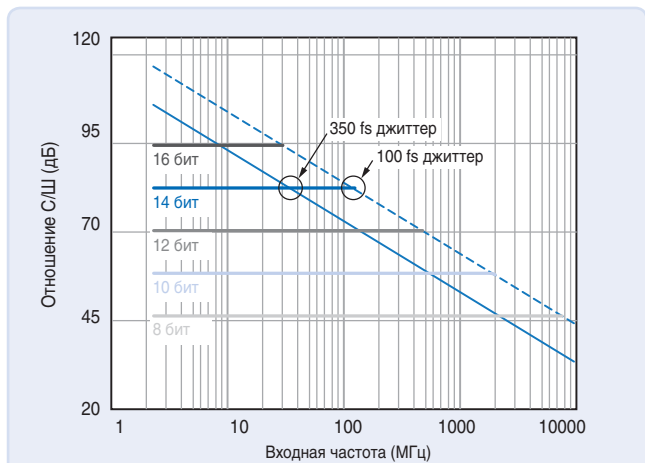


Рис. 3. Отношение сигнал/шум идеального АЦП в зависимости от частоты сигнала и джиттера

Если частота входного сигнала лежит близко к точке пересечения горизонтальных линий (SNR) и диагональных линий (джиттера), то надо либо смириться со снижением SNR, либо принять меры для снижения джиттера.

Итак, если величина джиттера увеличивается, то частота, на которой SNR будет определяться в основном джиттером, снижается.

Например, если 14-разрядный АЦП тестируется при величине джиттера тактового сигнала 350 фс, то частота входного сигнала не должна превышать 35 МГц (точка пересечения 14-разрядной горизонтальной линии и наклонной линии, соответствующей 350 фемтосекундам), если вы хотите избежать значительного ухудшения характеристик оцифровки. Если джиттер удастся снизить до 100 фс, то частота входного сигнала может простирается до 125 МГц без снижения качества оцифрованного сигнала.

Эта упрощённая модель хороша в первом приближении. Она становится неточной, когда частота сигнала находится вблизи точки пересечения. Чтобы полностью понимать, как

джиттер влияет на характеристики системы, необходимо рассматривать шум квантования и амплитуду входного сигнала, а не только разрядность (уравнение 3).

$$\text{SNR} = -20 \log_{10} \sqrt{ \underbrace{(2\pi f_a t_{j \text{ rms}})^2}_{\text{Джиттер тактового сигнала}} + \underbrace{\frac{2}{3} \left(\frac{1 + \epsilon}{2^N} \right)^2}_{\text{Шум квантования}} + \underbrace{\left(\frac{2\sqrt{2} V_{\text{NOISE rms}}}{2^N} \right)^2}_{\text{Эффективное значение шума}} } \quad (3)$$

Где SNR = отношение сигнал/шум в дБ;

f_a = частота аналогового синусоидального сигнала, соответствующего полной шкале;

$t_{j \text{ rms}}$ = среднеквадратичная величина суммарного джиттера сигнала и АЦП;

ϵ = средняя дифференциальная нелинейность АЦП (DNL) в LSB;

N = разрешающая способность АЦП, бит;

$V_{\text{NOISE rms}}$ = эффективное значение шума АЦП, приведенное ко входу.

Если $t_{j \text{ rms}} = 0$, $\epsilon = 0$ и $V_{\text{NOISE rms}} = 0$, то приведённое уравнение преобразуется в знакомое:

$$\text{SNR} = 6,02N + 1,76\text{dB}$$

Например, предположим, что АЦП обладает шумом квантования 0,5 LSB и что аналоговый входной сигнал на 0,5 дБ ниже сигнала полной шкалы. На рис. 4 (иллюстрирующем уравнения 2 и 3) видно, что джиттер тактового сигнала будет иметь влияние на несколько более низких частотах, чем в упрощённой модели.

Ранее приведенный пример демонстрировал, что тактовые импульсы с джиттером 350 фс не будут проявляться в 14-разрядной системе аналого-цифрового преобразования при частоте сигнала ниже 35 МГц. Однако если учитывать влияние шума квантования, частоту и амплитуду входного сигнала, то джиттер будет проявляться уже на частоте 10 МГц. И подобным образом джиттер величиной 100 фс начнёт проявляться на частоте ниже 100 МГц.

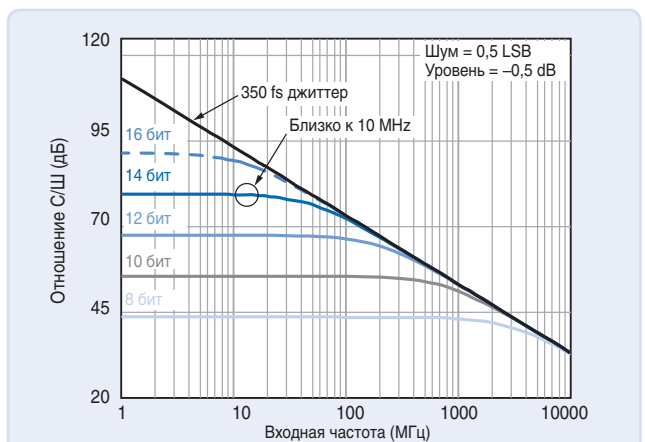
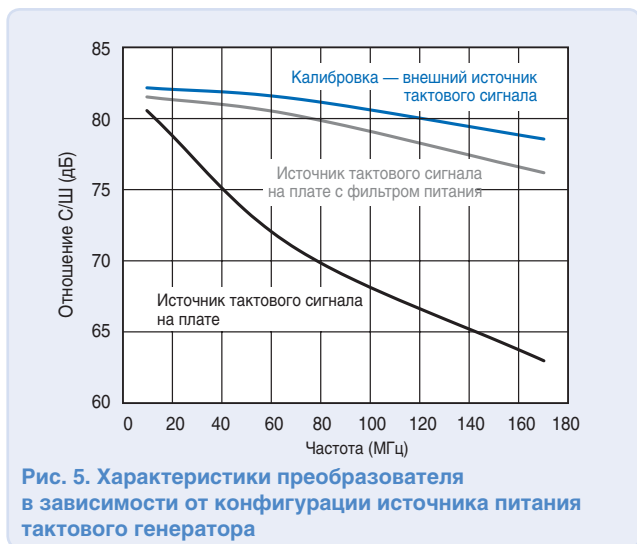


Рис. 4. Отношение сигнала/шум как функция частоты входного сигнала, джиттера тактового сигнала и шума квантования

КАК ЗАЩИТИТЬСЯ ОТ ДЖИТТЕРА

Итак, мы рассмотрели сущность джиттера и его влияние, теперь перейдём к его источникам. Всё, что может влиять на фронт тактового сигнала, приводит к увеличению джиттера. Это может быть взаимное влияние сигналов, электромагнитные помехи (EMI), шум на шине «земли» или шум источника питания.

Взаимное влияние может проявиться на двух близко расположенных дорожках печатной платы. Если по одной из них проходит сигнал, а в расположенной параллельно дорожке меняется ток, то эти изменения вызывают помеху в сигнальном проводе. Если это провод тактового сигнала, то эта помеха может повлиять на время прихода тактовых импульсов.



Также джиттер может возникнуть в результате действия электромагнитных помех (EMI) на сигнальные проводники. EMI генерируются импульсными источниками питания, высоковольтными линиями, радиочастотными схемами и другими подобными источниками. Эффект EMI, в сущности, такой же, как и эффект взаимного влияния проводников: модуляция тактовых сигналов.

На рис. 5 проиллюстрировано воздействие электромагнитных помех на величину отношения сигнал/шум SNR. Синяя линия показывает зависимость SNR от частоты для AD9446 при внешнем источнике тактовых импульсов и линейном источнике питания. Источник тактовых импульсов не имеет других связей с оценочной платой, на которой находится АЦП. Красная линия демонстрирует, насколько ухудшается SNR, если этот же источник тактового сигнала располагается на оценочной плате и вся плата запитана от импульсного источника питания. Зеленая линия демонстрирует значительное улучшение по сравнению с красной; в этом случае источник тактового сигнала располагался на плате, но был применён фильтр питания.

Также на величину джиттера негативно влияет наличие импульсных токов по шине заземления и неправильная конфигурация заземления на плате. Импульсные токи могут быть большими, если большое число логических элементов переключается одновременно. Это приводит к появлению острых импульсов на шине «земли» и заземляющей поверхности, смещению уровней сигналов и уровней срабатывания схем тактирования.

Рассмотрим следующий пример. Предположим, логический выход нагружен на ёмкость 10 пФ (это ёмкость дорожки на плате плюс ёмкость входа следующего логического элемента). Когда логический элемент переключается, ток может достигать 10 мА; эта цифра получена из предположения, что скорость нарастания напряжения составляет 1 В/нс (типично для логического элемента CMOS), тогда $I = C \cdot dV/dt$ $10 \text{ пФ} \cdot 1 \text{ В/нс} = 10 \text{ мА}$. Если переключается одновременно 12 таких логических элементов, то ток может составить 120 мА. Это может вызвать помехи по линиям питания и «земли», так как сопротивление земляной шины ненулевое. Таким образом, все схемы, располагающиеся на этой «земле», будут подвержены действию помехи.

Чтобы минимизировать джиттер, вызываемый перечисленными факторами, необходимо правильное конструирование платы с соответствующим разделением функциональных частей схем. Очень важно правильно разделять аналоговую и цифровую части схемы. Этот подход должен касаться всех слоёв платы. Важно понимать, каким образом возвратные токи проходят через заземляющие пути, и избегать перекрытия или пересечения аналоговых и цифровых схем. Короче говоря, чувствительные аналоговые линии и линии тактовых сигналов должны располагаться так, чтобы на них не влияли другие части схемы.

УЛУЧШЕНИЕ ДЖИТТЕРА ОЗНАЧАЕТ УЛУЧШЕНИЕ СКОРОСТИ НАРАСТАНИЯ

Теперь, когда сущность джиттера и его возможные источники рассмотрены, мы можем перейти к рассмотрению вопроса «Что я могу сделать с целью уменьшения джиттера моего источника тактовых сигналов?» Выше говорилось, что помехи и шумы могут повлиять на джиттер, если они появляются в момент фронта тактового сигнала, см. рис. 6. Делая фронт более крутым, мы сокращаем переходный период, в течение которого влияют помехи и шумы, и снижаем величину джиттера.

Но учтите, что увеличенная скорость переходов не может улучшить качество исходного тактового сигнала, она только уменьшает время перехода через пороговое значение. На рис. 2 б видно, что более быстрый сигнал быстрее проходит через «переходную» область. На рис. 7 показано, что джиттер и скорость нарастания обратно пропорциональны. Вспоминая вышеприведенный пример, отметим, что для 12-разрядного АЦП при частоте сигнала 70 МГц требуется джиттер 100 фс и скорость нарастания тактового сигнала 1 В/нс.

Итак, минимизация джиттера подразумевает увеличение времени нарастания фронтов тактового сигнала. Один из путей — это улучшение самого источника тактовых импульсов. На рис. 8 показаны характеристики некоторых готовых источников тактового сигнала, применённых для тактирования одного из самых высококачественных АЦП фирмы Analog Devices, 16-разрядного AD9446 с частотой дискретизации 80 МГц, при разных частотах сигнала.

Максимальные характеристики АЦП (синяя линия) достигнуты с помощью хорошего специализированного источника тактовых импульсов. Не во всех случаях есть возможность применить такой высококачественный, термостатированный генератор с низким джиттером. Однако некоторые источники тактовых импульсов всё же могут обеспечить приемлемые характеристики, даже на высоких частотах. На рис. 8 показаны графики, соответствующие менее дорогим генераторам.



Рис. 6. Фронт тактового импульса дифференциального тактового сигнала

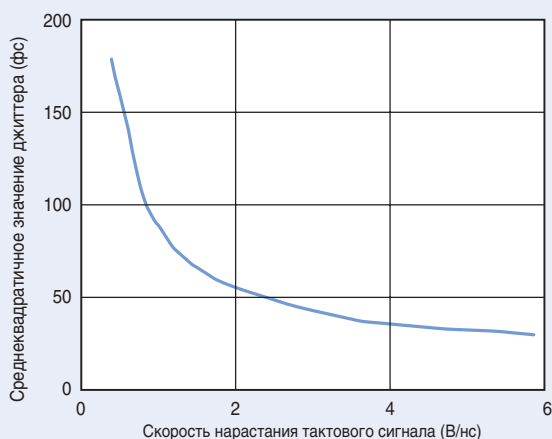


Рис. 7. Среднеквадратичное значение джиттера в зависимости от времени нарастания

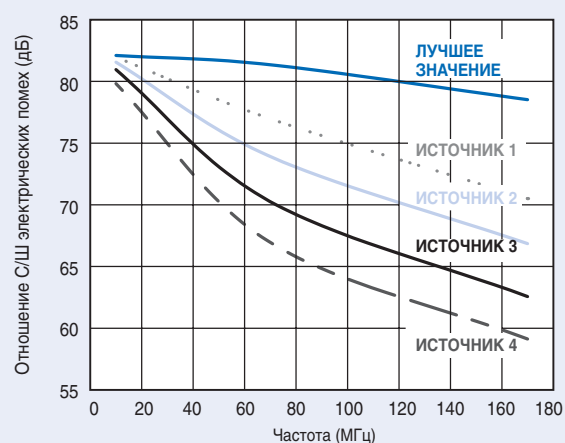


Рис. 8. Характеристики системы с АЦП AD9446-80 зависят от выбранного тактового источника

Важно уделить внимание выбору генератора, если вы решили купить специализированный готовый, так как поставщики генераторов не придерживаются единой методики измерения джиттера. Самый прагматичный подход — это взять несколько таких генераторов и испытать их непосредственно в вашей системе. Конечно, можно сделать некоторые предварительные оценки, основываясь на предположении, что все производители придерживаются стандартов контроля качества. Но всё же лучше вступить в контакт с поставщиком и запросить данные по поводу фазового шума и джиттера, и получить информацию, как согласовать выход генератора. Плохое согласование по нагрузке тактового генератора может значительно ухудшить динамический диапазон (SFDR) системы.

ДАЛЬНЕЙШИЕ УЛУЧШЕНИЯ

Если характеристик имеющегося генератора недостаточно, то нужно рассмотреть возможности деления частоты и фильтрации. Формула 4 описывает источник синусоидального сигнала:

$$V(t) = A \sin 2\pi ft \quad (4)$$

На скорость нарастания влияют два параметра: частота f и амплитуда A . Увеличение этих параметров означает увеличение скорости нарастания и уменьшение джиттера сигнала. Обычно проще увеличить тактовую частоту. А затем, для получения необходимой тактовой частоты, можно применить делитель частоты.

Делители частоты повышают число компонентов и энергопотребление. Они также вносят дополнительный джиттер, как и любой активный компонент (формула 5).

$$j_{total} = \sqrt{j_{source 1}^2 + j_{source 2}^2 + j_{source n}^2} \quad (5)$$

При использовании делителя частоты нужно рассмотреть все относящиеся к нему параметры. Типичное значение джиттера микросхем специализированного семейства AD951x составляет около 250 фс. В данном семействе есть делители частоты тактового сигнала, а также микросхемы для распределения сигнала и регулировки скважности.

Делитель частоты будет вносить некоторый джиттер, однако этот джиттер небольшой относительно общей величины. Так как происходит деление частоты, джиттер становится очень мал относительно периода сигнала и поэтому вносит меньшую погрешность. Например, тактовый генератор в 100 МГц обладает величиной джиттера 800 фс (около 12,5% от 10-наносекундного периода), а делитель частоты понижает частоту до 10 МГц и вносит джиттер величиной 250 фс, то получившийся джиттер 840 фс будет составлять менее 1% от периода 100 нс.

Из уравнения 5 следует, что главный источник джиттера доминирует по отношению к остальным; если джиттер, вносимый некоторым данным источником, составляет менее 1/3 от доминирующего, то нет смысла снижать джиттер в этом месте. Выбор источника сигнала зависит от требуемых характеристик системы, таких как SNR в заданном частотном диапазоне, и от обычных ограничений по цене и размерам.

СНИЖЕНИЕ ФАЗОВОГО ШУМА

Согласно уравнению 5, суммарный джиттер равен корню из суммы квадратов джиттера источника сигнала, схемы деления и других компонентов. Таким образом, если на делитель частоты подаётся сигнал от «шумного» источника, возможности схемы не будут полностью реализованы, т.к. наибольший источник шума будет доминировать. В этом случае нужно рассмотреть возможность фильтрации «шумного» сигнала с помощью узкополосного фильтра.



Рис. 9. Уменьшение джиттера за счёт фильтрации и деления частоты

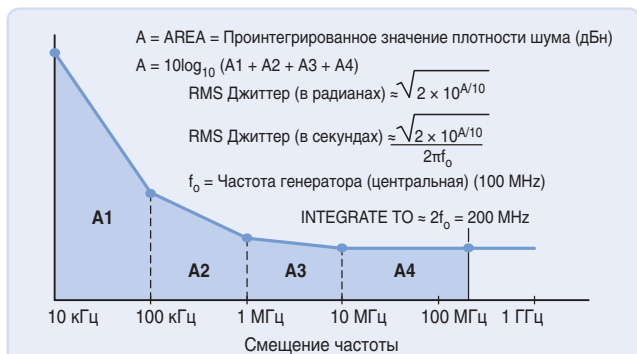


Рис. 10. Пересчёт фазового шума в величину джиттера

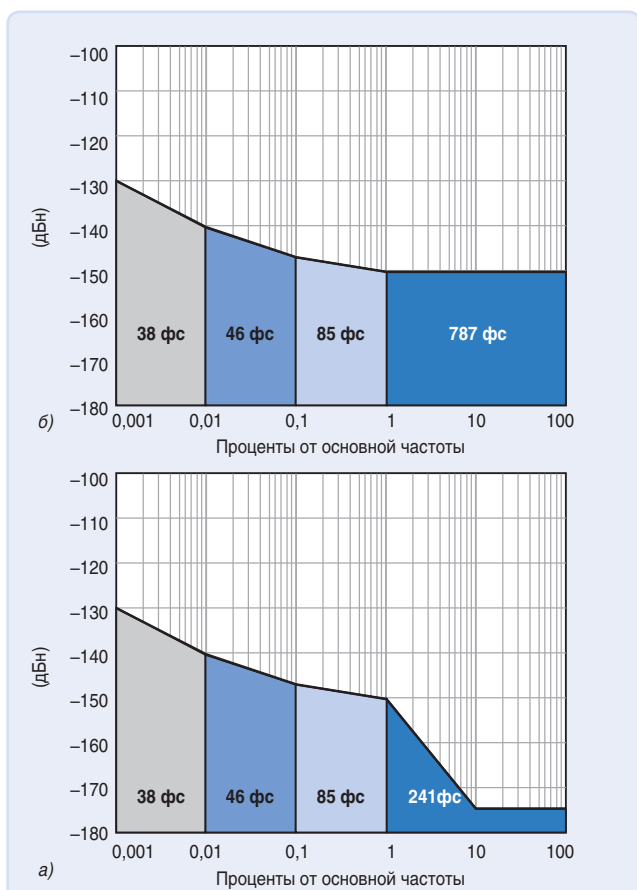


Рис. 11. а) Фазовый шум источника с джиттером 800 фс. б) Фазовый шум источника с джиттером 300 фс и полосового фильтра с относительной полосой пропускания 5%

Следующий пример продемонстрирует преимущества фильтрации. Например, источник сигнала обладает джиттером 800 фс. Если делитель находится между источником и АЦП, джиттер может быть уменьшен примерно до 500 фс, хотя делитель может обеспечить и лучшие характеристики. Но если мы поместим узкополосный LC-фильтр между генератором и делителем, мы можем уменьшить джиттер примерно до 250 фс (рис. 9).

Чтобы понять, как фильтр может улучшить джиттер синусоидального источника, полезно взглянуть на спектр фазового шума этого источника. Этот метод прост и обеспечивает сравнительно хороший результат, но в нем не учитываются некоторые факторы, такие как скорость нарастания. Поэтому в результате расчётная величина джиттера получается немного выше реальной.

Чтобы выполнить расчёт, необходимо поделить график спектра фазового шума на отрезки, а затем проинтегрировать плотность шума в каждом диапазоне, как показано на рис. 10. Это позволяет оценить уровень шума, вносимый каждым участком спектра, а также суммарный уровень шума (как корень из суммы квадратов). Здесь f_0 означает центральную частоту. Полученный фазовый шум надо умножить на $\sqrt{2}$, так как на графике показана только половина симметричного спектра.

Рассмотрим теперь источник с джиттером 800 фс. График позволяет понять, какие частотные области вносят основной вклад в джиттер. Видно, что основная часть джиттера образуется за счёт широкополосного шума. Таким образом, если мы приложим основные усилия к подавлению широкополосного шума, мы получим максимальный эффект.

Применение простого узкополосного LC-фильтра на выходе тактового генератора позволило значительно улучшить характеристики сигнала, как показано на рис. 11 б. Джиттер улучшился с 800 фс до менее чем 300 фс. Соответствующее улучшение SNR системы в целом составляет 12 дБ.

LC-фильтр может оказаться недопустимо большим и дорогим. В таком случае можно применить кварцевый фильтр. На рис. 12 видно, что в данном случае джиттер уменьшился с 800 фс до 100 фс. Это обеспечивает ещё дополнительных 3 дБ SNR системы, и теперь улучшение SNR достигло 15 дБ по сравнению с исходным значением, соответствующим джиттеру 800 фс.

Чтобы продемонстрировать эффективность такого каскадирования фильтров при шумном источнике, мы применили старый лабораторный генератор импульсов для тактирования АЦП AD9446 (16 разрядов, 100 МГц). Без фильтра генератор обладал джиттером около 4 пс и SNR было на 30 дБ хуже возможного. После применения кварцевого фильтра джиттер снизился до примерно 50 фс и характеристики системы приблизились к приведённым в техническом описании АЦП.

Кварцевые фильтры с их узкой полосой пропускания (обычно менее 1%) могут снизить джиттер различных источников до менее чем 100 фс, но они могут быть дорогими и большими. Кроме того, кварцевые фильтры рассчитаны на определённый уровень сигналов, обычно от 5 до 10 дБм. Если сигнал выходит за этот диапазон, то появятся нелинейные искажения и это приведёт к снижению SFDR системы в целом. Для некоторых фильтров необходимы внешние компоненты для согласования импеданса. Всё это требует правильного расчёта и приводит к повышению стоимости.

Резюме по поводу применения делителей частоты и фильтров приведено в табл. 1.

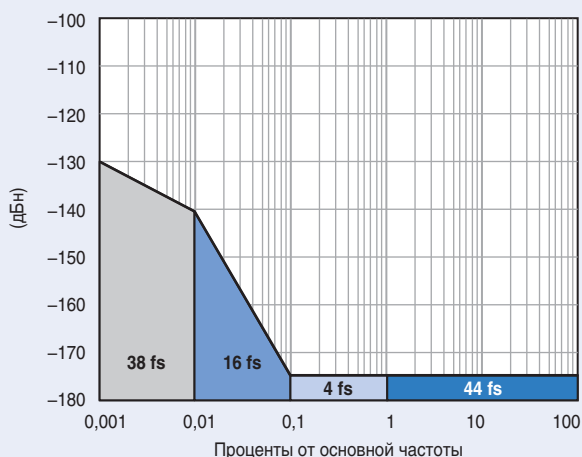


Рис. 12. Фазовый шум тактового генератора с джиттером 800 фс и кварцевого полосового фильтра

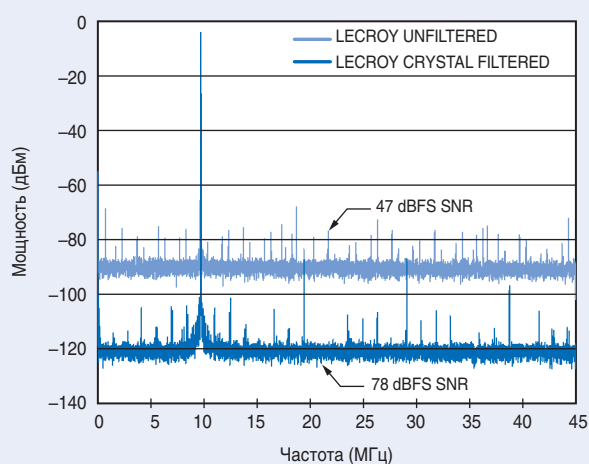


Рис. 13. Кварцевый фильтр полезен при «шумном» источнике сигнала тактирования

Таблица 1

Применение делителей частоты фильтров

| | Делитель частоты | LC-фильтр, полоса 5% | Кварцевый фильтр |
|---------------|---|---|--|
| За | <ul style="list-style-type: none"> Недорогой (\$5...20); Высокая скорость нарастания при низкой частоте; Можно регулировать скважность; Специальные микросхемы обеспечивают много выходов | <ul style="list-style-type: none"> При хорошем источнике можно достичь джиттера 100 фс; Малое время на переходные процессы; Большая максимальная мощность входного сигнала | <ul style="list-style-type: none"> Обеспечивает ультранизкий джиттер; Очень небольшой; Бывают согласованными для 50-омных линий |
| Против | <ul style="list-style-type: none"> Джиттер в лучшем случае 200...250 фс | <ul style="list-style-type: none"> Не можем менять частоту; Скважность всегда равна 2; Более дорогие, чем делители: ~\$300 | <ul style="list-style-type: none"> Не можем менять частоту; Скважность всегда равна 2; Цена процентов на 50 выше, чем у LC-фильтров |
| Важно | <ul style="list-style-type: none"> Для лучшей производительности поместите полосовой фильтр перед делителем | <ul style="list-style-type: none"> Делители могут несколько ухудшить джиттер; Выходная мощность определяется входной и потерями в фильтре | <ul style="list-style-type: none"> Выходная мощность определяется входной и потерями в фильтре; Ограниченный уровень входного сигнала |

Желательно ограничить уровень сигнала, поступающего на вход тактирования АЦП, с помощью двух встречно включенных диодов Шотки. Это позволит увеличить амплитуду и таким образом увеличить скорость нарастания, но оставить уровень сигнала на входе АЦП в допустимом диапазоне.

Если система тактирования компактна или дорожки от выходного каскада короткие, рассмотрите возможность применения трансформатора вместе с ограничивающими диодами. Трансформатор — пассивное устройство и он не добавит джиттера. Трансформатор может обеспечить повышение напряжения генератора. Наконец, трансформатор сам по себе обеспечивает полосовую фильтрацию. Трансформаторы с коэффициентом 1:2 или 1:4 имеют узкую полосу, обеспечивая фильтрацию сигнала. Кроме того, трансформатор может преобразовывать однопроводной сигнал в дифференциальный — а с таким сигналом работает большинство современных быстродействующих АЦП.

Имейте в виду, что не все диоды работают одинаково хорошо (рис. 14). Синяя линия соответствует диодам, лучшим из доступных. Все характеристики получены при одинаковых условиях. Внимательно читайте спецификации и обращайтесь внимание на динамическое сопротивление диодов и общую ёмкость. Диоды с низкими R и C лучше всего.

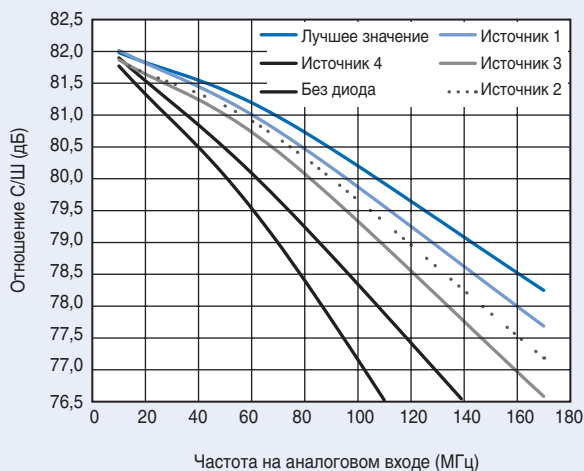


Рис. 14. Характеристики AD9446-80 зависят от выбранного типа диодов

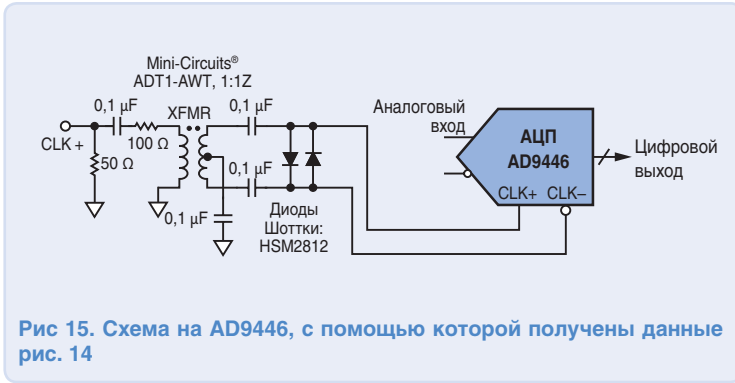


Рис. 15. Схема на AD9446, с помощью которой получены данные рис. 14

В тесте применялся преобразователь AD9446 (16 разрядов, 80 МГц), менялась только марка диодов. Схема показана на рис. 15.

УМЕНЬШЕНИЕ ДЖИТТЕРА В ИНТЕРФЕЙСАХ ТАКТОВЫХ СИГНАЛОВ

Существует много схем подачи тактовых сигналов на выводы, предназначенные для тактирования. Однако вернёмся к уравнению 5.

Каждый компонент (источник сигнала, драйвер, разветвитель, делитель и т. д.) в сигнальной цепочке привносит некоторый джиттер. На рис. 16 показано, что два усилителя-драйвера, каждый из которых обеспечивает джиттер 700 фс, при величине джиттера самого источника 300 фс ухудшает разрешающую способность с 12 разрядов до менее чем 10 на частоте 140 МГц.

Таким образом, минимизация числа компонентов способствует сохранению низкой величины джиттера.

Необходимо уделить внимание и выбору типа логических элементов. Логические элементы общего назначения — это не лучший выбор, если вы хотите получить высокие характеристики системы на высоких частотах. Необходимо внимательно изучать технические описания и обращать внимание на такие спецификации, как время переключения и джиттер. Это особенно важно, если источник обладает очень малым джиттером. Например, на рис. 17 источник А обладает уровнем джиттера 800 фс, а источник В — 125 фс. С кварцевым фильтром уровень джиттера может снизиться до соответственно 175 фс

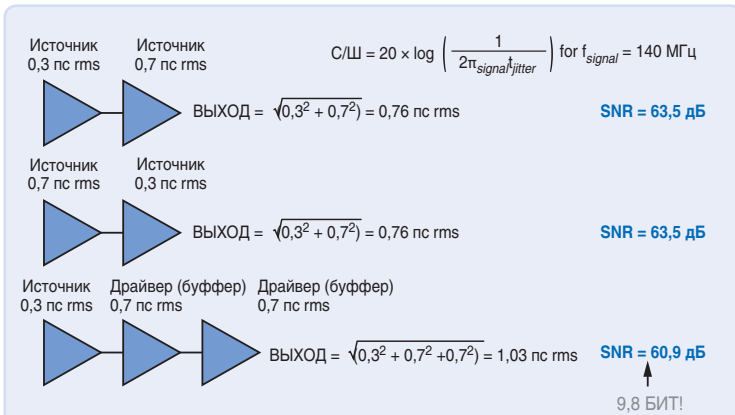


Рис. 16. Усилители-драйверы в сигнальной цепи увеличивают джиттер и уменьшают соотношение сигнал/шум (SNR)

и 60 фс. Однако, делитель или логический элемент может увеличить джиттер до приблизительно 200 фс в обоих случаях. Это говорит о важности правильного выбора всех компонентов цепочки тактирования.

Ещё один общепринятый подход приводит к невозможности получить обещанные в техническом описании характеристики. Гибко программируемый драйвер можно получить с помощью программируемой матрицы FPGA (часто там имеется схема цифрового управления тактированием, digital clock manager — DCM, которая обеспечивает деление частоты). Однако как показано на рис. 18, это приводит к очень сильному ухудшению характеристик АЦП, например AD9446-80 (частота дискретизации 80 МГц) при этом обеспечивает только 13 разрядов. Хороший генератор гарантирует хорошие характеристики системы в широком диапазоне частот, как показывает красная кривая. Зелёная кривая соответствует тому же источнику тактового сигнала, но ячейка FPGA стоит между генератором тактовых импульсов и АЦП. На частоте 40 МГц это приводит к уменьшению



Рис. 17. Логические элементы повышают джиттер

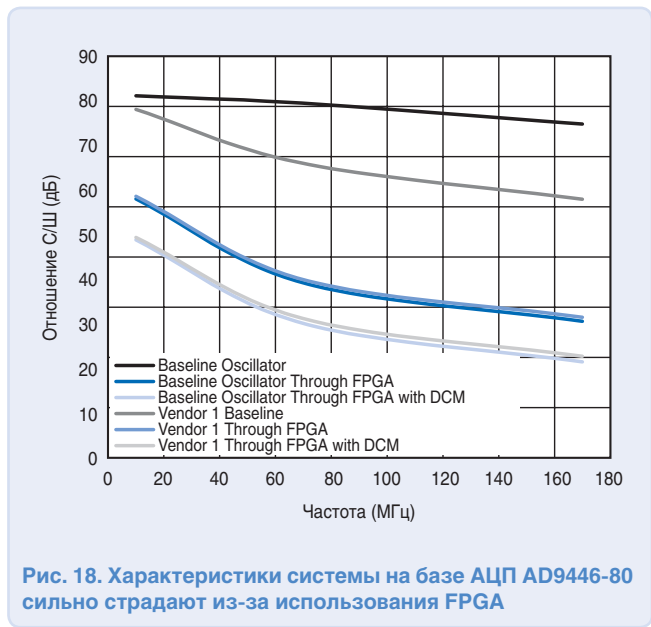


Рис. 18. Характеристики системы на базе АЦП AD9446-80 сильно страдают из-за использования FPGA

SNR до 52 дБ (8,7 разряда), а схема DCM отнимает ещё 8 дБ (1,3 разряда). Такое ухудшение характеристик очень существенно и означает, что FPGA вносит очень большой дополнительный джиттер, около 10 пс.

Процесс выбора драйвера тактового сигнала может быть непрост. В табл. 2 даны величины джиттера для некоторых типов логических драйверов. Драйверы из нижней части таблицы помогут создать более качественную систему с АЦП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Чтобы достичь максимально возможных характеристик преобразователя, важно рассматривать всю систему тактирования в целом. Рис. 3 и уравнения 1 и 2 помогут понять, какая величина джиттера требуется. Если частота сигнала близка к диагональной границе или выходит за неё, необходимо выбрать качественный источник сигнала тактирования и уделить внимание всей сигнальной цепочке.

Уменьшение джиттера можно обеспечить различными путями, в том числе улучшением качества источника сигнала, фильтрацией и/или делением частоты, а также соответствующим выбором компоновки системы. Обратите внимание на скорость нарастания фронтов тактового сигнала: чем она выше, тем менее чувствителен тракт тактового сигнала к шуму и помехам.

Для прохождения тактового сигнала используйте только минимально необходимое число компонентов, т. к. каждый компонент будет вносить дополнительный джиттер. И наконец, не применяйте «дешёвые» логические элементы, их характеристики могут существенно ухудшить качество системы. Невозможно ожидать чемпионских результатов от автомобиля за 70 тысяч долларов, если он укомплектован шинами за \$20.

| | |
|---|--|
| FPGA | 33 пс... 50 пс (только драйверы, не считая систем автоподстройки частоты DLL/PLL) ¹ |
| 74LS00 | 4,94 пс ² |
| 74HC700 | 2,2 пс ² |
| 74ACT00 | 0,99 пс ² |
| 74ACT00 | 0,99 пс ² |
| MC100EL16 PECL | 0,7 пс ¹ |
| Семейство AD951x | 0,22 пс ¹ |
| NBSG16, ECL с уменьшенным размахом сигнала (0,1 В) | 0,2 пс ¹ |
| ADCLK9xx, драйверы тактовых импульсов ECL Analog Devices | 0,1 пс ¹ |

¹ Данные производителя.

² Величина вычислена на основе ухудшения SNR в системе с АЦП.