

Гальваническая развязка интерфейса SPI при работе с широкополосными датчиками

По многим причинам шины последовательного периферийного интерфейса (SPI, serial peripheral interface) пользуются большой популярностью у разработчиков. Шина SPI может работать с высокими скоростями (до 60 Мбит/с), обеспечивая передачу данных на короткие расстояния, например между отдельными микросхемами на печатной плате. Концептуально она очень проста и содержит сигнал тактовой синхронизации, две линии данных, а также сигнал выбора микросхемы. Поскольку данные выдаются на шину в одной фазе тактового сигнала, а считываются в другой, интерфейс предоставляет достаточный запас для учета задержек и рассогласования скоростей. И наконец, шина состоит из однонаправленных линий, что упрощает ее установку в микропроцессоре. Это избавляет от необходимости в дополнительных средствах управления процессом приема/передачи данных и делает шину очень удобной для реализации гальванической развязки при помощи оптопар или цифровых изоляторов, поскольку оптопары являются однонаправленными устройствами.

Марк КЭНТРЕЛЛ (Mark CANTRELL)
Бикиран ГОСВАМИ (Bikiran GOSWAMI)

Введение

В промышленных системах, например системах контроля температуры или давления, для АЦП, выполняющего оцифровку сигнала датчика, не требуется высокой частоты дискретизации, а следовательно, и высокая тактовая частота SPI не нужна. Благодаря этому даже реализация схемы интерфейса с гальванической развязкой на основе самых разных технологий не представляет больших проблем. В то же время требования постоянно растут, и на сегодня в задаче, где необходима передача данных на большие расстояния с высокой скоростью и гальванической развязкой, интерфейс SPI должен работать на пределе своих возможностей. В этой статье мы дадим обзор шины SPI, рассмотрим ее ограничения, а также способы их преодоления в системах с гальванической развязкой.

Примером задачи, в которой изолированный интерфейс SPI должен функционировать с полной отдачей, является обработка сигнала датчика с широким динамическим диапазоном. При проектировании систе-

мы с широким динамическим диапазоном специалисты обычно начинают с выбора АЦП, обладающего хорошим отношением «сигнал-шум», который, как правило, напрямую зависит от разрядности слова. В преобразователях часто используется разрядность 16 бит и менее. В случаях, когда динамического диапазона, обеспечиваемого 16-разрядным преобразователем, недостаточно, можно применить другие методы, например усилитель с переменным коэффициентом усиления или избыточную дискретизацию. При избыточной дискретизации уменьшение шума достигается ценой увеличения полосы. Удвоение частоты дискретизации обычно приводит к улучшению шумовых характеристик на 3 дБ. Так, работа с избыточной дискретизацией в 75 раз дает улучшение уровня шума и динамического диапазона примерно на 18 дБ. Избыточная дискретизация сигнала в 75 раз означает, что АЦП, работающий с быстродействием 900 квыб./с (kSPS), даст на 18 дБ больший динамический диапазон в полосе примерно 6 кГц. Естественно, пользователь может ва-

рьюлировать соотношение полосы и динамического диапазона, однако в конечном счете работа АЦП на максимальной скорости дает и максимальный выигрыш. В то же время шине SPI придется иметь дело с огромным объемом данных. Рассмотрим эту проблему подробнее на примере типичного компонента, применяемого в системах с высокой частотой дискретизации, — АЦП семейства pulSAR компании Analog Devices AD7985, который способен функционировать с быстродействием до 2,5 Мвыб./с (MSPS).

Интерфейсы АЦП

Типичный аналого-цифровой преобразователь в процессе обработки данных осуществляет две операции, как показано на рис. 1. Сначала АЦП находится в фазе преобразования (интервал t_{CONV}), в которой он выполняет внутреннюю процедуру формирования цифрового слова, соответствующего напряжению на его входе. Затем АЦП передает полученное слово данных в контроллер в течение фазы сбора данных (интервал t_{ACQ}). АЦП обладает временем минимального цикла (t_{CYC}) — интервалом времени, которое должно пройти от начала одного преобразования до начала другого преобразования. Оно приблизительно равно сумме t_{CONV} и t_{ACQ} , но может быть и короче, если АЦП имеет специальные режимы, в которых фазы преобразования и передачи могут перекрываться. В дальнейшем для



Рис. 1. Простая последовательность преобразования и передачи данных в АЦП

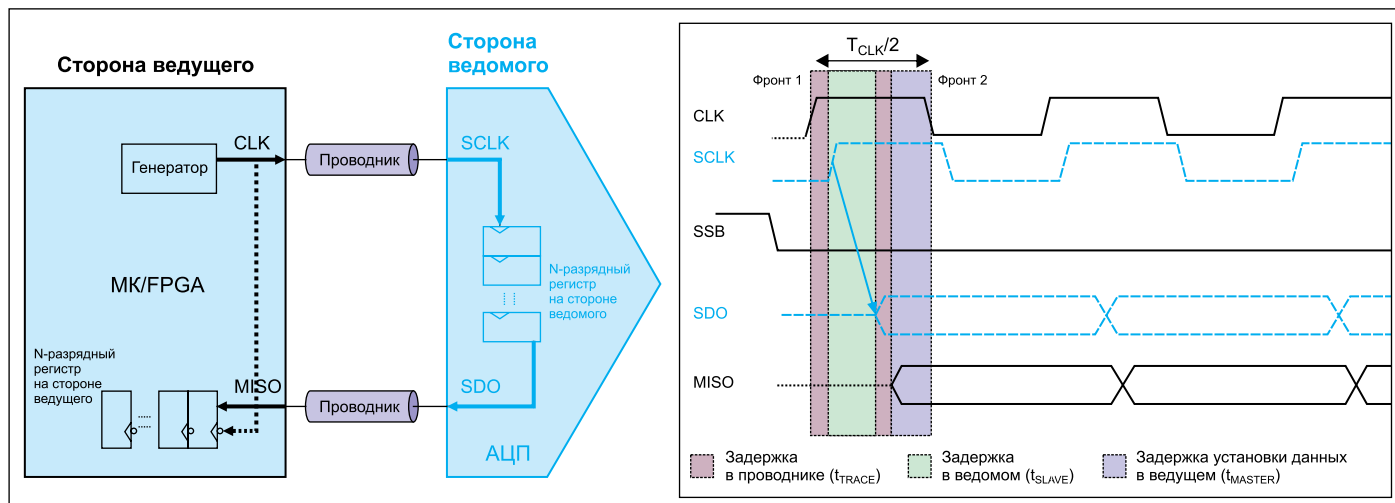


Рис. 2. Блок-схема интерфейса SPI для передачи данных из АЦП в МК и временная диаграмма его работы

простоты мы будем анализировать режим с последовательными циклами преобразования и сбора данных.

Время преобразования и время минимального цикла фиксированы независимо от способа передачи данных. Время сбора данных зависит от свойств интерфейса данных, а в большинстве случаев и от параметров функционирования шины SPI. Если время сбора данных увеличивается из-за уменьшения тактовой частоты SPI, то частота дискретизации АЦП может быть серьезно ограничена.

Ограничения на тактовую частоту SPI

Канал SPI между микропроцессором/FPGA (МК) и АЦП изображен на рис. 2. Шина SPI состоит из соединений между парой регистров сдвига, одним на стороне ведущего (МК) и одним на стороне ведомого (АЦП) устройства. Тактовый сигнал, используемый для синхронизации передачи, формирует МК. По одному из фронтов тактового сигнала происходит выдача данных из регистров сдвига для передачи в шину, а по другому фронту — прием данных в регистры сдвига на противоположной стороне. В случае с АЦП передача данных от МК необходима не всегда, поэтому для простоты этот канал исключен из рассмотрения, как и сигнал выбора ведомого. АЦП заполняет свой внутренний регистр сдвига в фазе преобразования и последовательно выдает данные из регистра в фазе сбора данных.

В ходе выполнения транзакции SPI-сигнал тактовой синхронизации, формируемый ведущим устройством, поступает в ведомое устройство через проводные соединения, вносящие некоторую задержку. При получении тактового сигнала ведомое устройство последовательно выдает данные из регистра сдвига, также внося определенную внутреннюю задержку. Сигнал данных проходит

в обратном направлении к ведущему устройству, и с учетом задержек в проводных соединениях они должны достичь назначения до появления противоположного фронта тактового сигнала. Кроме того, ведущим устройством обычно предъявляются дополнительные требования к времени установления сигнала на этой линии. Временная диаграмма работы интерфейса изображена на рис. 2, и перечисленные выше задержки

определяют минимальную длительность половины периода задающего тактового сигнала. В системах без гальванической развязки такие задержки обычно невелики и в большинстве случаев не превышают 10 нс, что позволяет интерфейсу SPI работать со скоростью более 50 МГц.

Если в линию передачи данных SPI добавить изолирующий барьер, как показано на рис. 3, он прибавляет к величине задержки

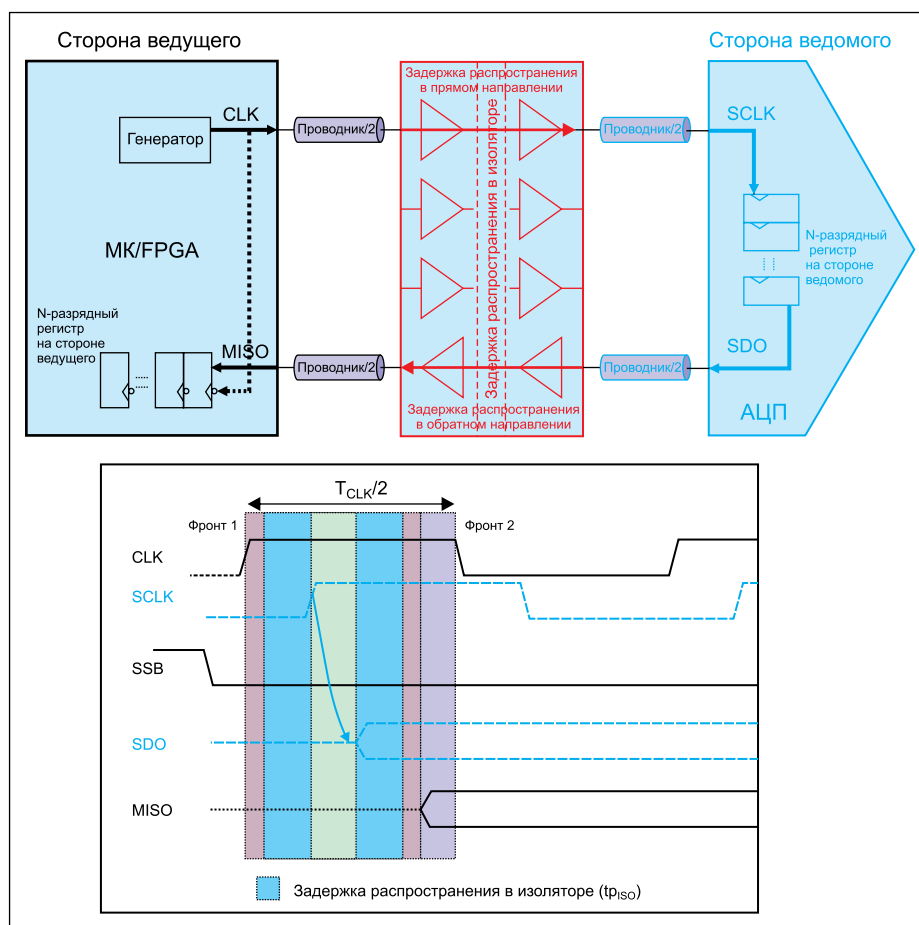


Рис. 3. Блок-схема изолированного интерфейса SPI для передачи данных из АЦП в МК и временная диаграмма его работы

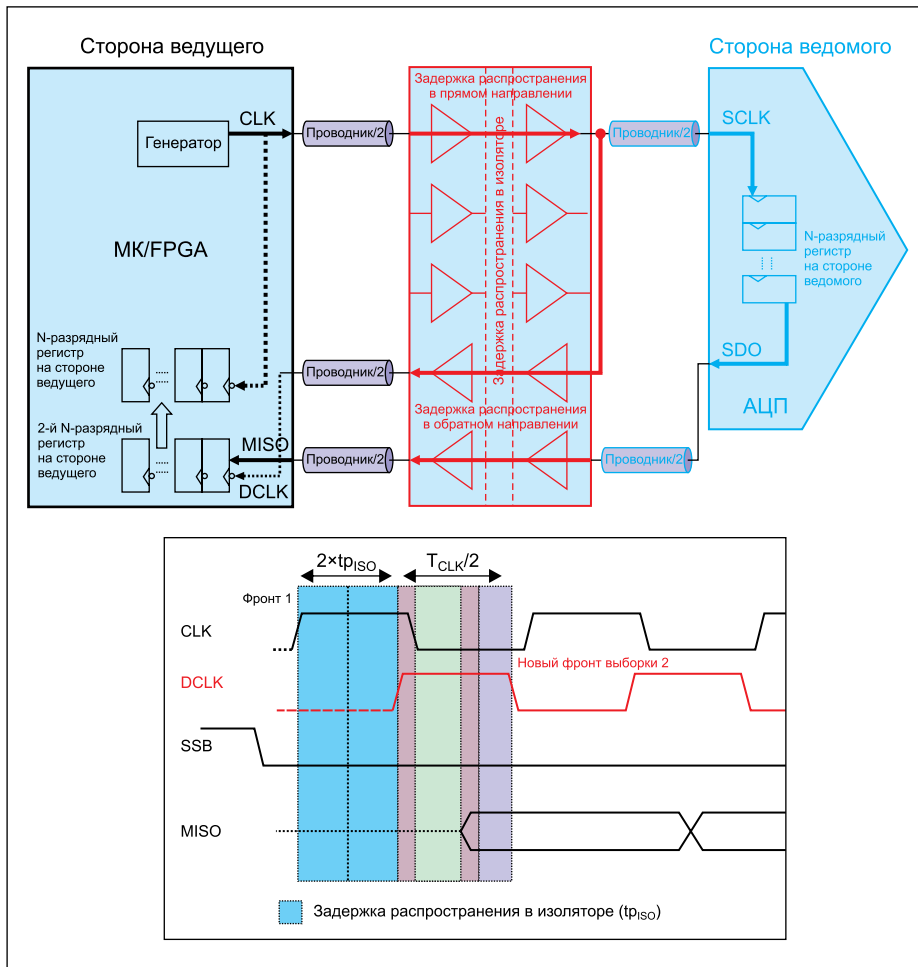


Рис. 4. Изолированная система с независимым тактовым сигналом данных

проводника свою задержку. В зависимости от технологии, предусмотренной для гальванической развязки, задержка распространения сигнала (t_{PISO}) через изолятор может достигать 100 нс и более. Рис. 3 также показывает, что дополнительные задержки требуют увеличения времени, необходимого для завершения транзакции, и приводят к значительному расширению половины периода тактового сигнала SPI. Задержки гальванической развязки преобладают над всеми остальными типами задержек в системе и могут вызывать сокращение максимальной тактовой частоты до нескольких МГц.

Основное ограничение, накладываемое на период тактового сигнала, связано с необходимостью поступления данных в ведущее устройство до прихода следующего фронта тактового сигнала. В системах без гальванической развязки это требование не столь критично, и любые ограничения используются для повышения надежности за счет дополнительного запаса по синхронизации. Однако как только задержка распространения начинает вносить доминирующий вклад в длительность половины периода, максимальная скорость шины значительно падает.

К счастью, существует способ обойти это ограничение. Если данные, возвращаемые

из ведомого устройства, синхронизированы с независимым тактовым сигналом, он может быть использован в МК для приема данных в отдельном регистре сдвига. В данном случае пропускная способность шины SPI уже ограничена не задержкой распространения изоляционного барьера, а пропускной способностью изолятора.

Независимый тактовый сигнал DCLK можно легко породить, добавив в изоляторе согласованный высокоскоростной канал и посылая по нему вместе с данными копию изолированного тактового сигнала SPI, как показано на рис. 4. Этот подход требует дополнительных аппаратных средств в изоляционном барьере, дополнительного канала гальванической развязки и регистра сдвига с независимой тактовой синхронизацией в МК. Вместо стандартного регистра SPI МК будет считывать данные из вторичного приемного регистра.

Для того чтобы проиллюстрировать реализацию этого метода передачи совместно с разными технологиями, мы рассмотрим три примера и дадим количественный анализ максимального быстродействия, потребляемой мощности и необходимой площади на печатной плате. Мы увидим, что в отличие от стандартного изолированного

интерфейса SPI, где быстродействие ограничивается полной задержкой распространения в прямом и обратном направлениях, в схеме с задержанным тактовым сигналом предельное значение тактовой частоты определяется временными рассогласованиями и искажениями в изоляторе.

Гальваническая развязка при помощи оптопар

В типичных промышленных системах для гальванической развязки высокоскоростных шин часто используются одноканальные цифровые оптопары. Для гальванической развязки стандартной 4-проводной шины SPI нужно четыре такие оптопары. Чтобы оценить максимальную частоту тактового сигнала SPI, зададим следующие параметры, характерные для популярных промышленных КМОП-оптопар:

- Максимальная скорость передачи данных (12,5 Мбит/с) или минимальная длительность импульса (80 нс).
- Максимальная задержка распространения (t_{PISO}) 40 нс.
- Максимальные искажения длительности импульса (PWD) 8 нс.
- Максимальный разброс задержки распространения от компонента к компоненту (t_{PSK}) 20 нс. Этот параметр важен, поскольку для гальванической развязки шины SPI необходимо несколько оптопар.

Также зададим некоторые типичные значения задержек для различных компонентов схемы, изображенных на рис. 3. Задержка каждого проводника полагается равной 0,25 нс, и, следовательно, суммарная задержка в проводниках (t_{TRACE}) составляет 1 нс. Задержка ведомого устройства (t_{SLAVE}) и время установления в ведущем устройстве (t_{MASTER}) полагаются равными 3 и 2 нс соответственно.

Таким образом, на основании приведенного выше обсуждения, длительность половины периода тактового сигнала шины SPI при гальванической развязке с использованием выбранных в примере оптопар будет больше либо равна:

$$t_{TRACE} + t_{SLAVE} + t_{MASTER} + 2t_{PISO} = 86 \text{ нс.}$$

Из этого следует, что частота тактового сигнала SPI не должна превышать 5,75 МГц. Очевидно, что в данном случае значение $2t_{PISO}$ значительно замедляет работу шины SPI.

Теперь рассмотрим ситуацию, когда в обратном направлении добавляется дополнительный изолятор для передачи изолированного тактового сигнала в ведущее устройство, то есть реализуется схема с задержанным тактовым сигналом на рис. 4. Это позволяет нам генерировать тактовый сигнал синхронно с данными, возвращаемыми из ведомого устройства. Полная задержка распространения изолятора в прямом и обратном направлениях ($2t_{PISO}$) в таком случае больше не огра-

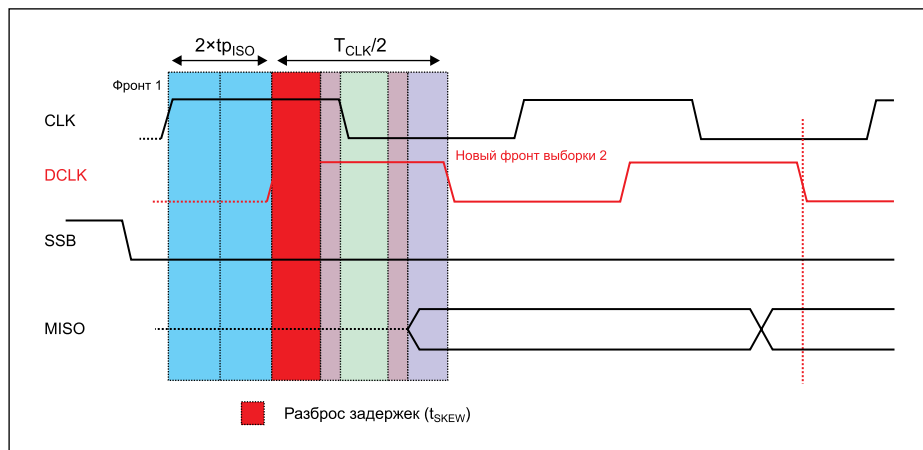


Рис. 5. Реальная временная диаграмма DCLK

ничивает тактовую частоту. Но сможет ли теперь, с учетом всех остальных задержек в системе, длительность половины периода тактового сигнала SPI достигать:

$$t_{TRACE} + t_{SLAVE} + t_{MASTER} = 6 \text{ нс},$$

что соответствует максимальной тактовой частоте SPI 80 МГц? К сожалению, ответ не так прост.

При вычислении минимального периода тактового сигнала SPI необходимо учитывать асимметрию сигналов в прямом и обратном каналах (t_{SKEW} на рис. 5). Рассогласование задержек распространения от компонента к компоненту и искажение длительности импульса ограничивают новое значение половины периода тактового сигнала SPI снизу величиной:

$$t_{TRACE} + t_{SLAVE} + t_{MASTER} + 2PWD + 2t_{PSK} = 62 \text{ нс}.$$

Это соответствует реальной максимальной тактовой частоте 8 МГц. Однако из-за собственных ограничений на минимальную длительность импульса (80 нс) выбранная оптопара способна поддерживать работу с максимальной тактовой частотой SPI всего 6,25 МГц. Приведенный пример иллюстрирует, что даже в отсутствие собственных ограничений на минимальную длительность импульса оптопары величина t_{SKEW} приводит к существенному ограничению максимальной тактовой частоты SPI: 6,25 МГц в реальной системе вместо потенциальных 80 МГц при идеальном согласовании задержек.

Может ли помочь применение более производительной оптопары с меньшей минимальной длительностью импульса? Оптопара с очень высоким быстродействием, имеющая минимальную длительность импульса 20 нс, позволит нам повысить скорость работы интерфейса. Однако даже такие устройства обладают довольно высокими рассогласованиями и искажениями импульса. При $t_{PSK} = 16$ нс и $PWD = 2$ нс ми-

нимальная длительность половины периода тактового сигнала SPI будет равна 42 нс, что соответствует максимальной тактовой частоте 11,75 МГц. В обоих рассмотренных случаях временные характеристики оптопар будут ухудшаться в процессе эксплуатации устройства, что приведет к дополнительному рассогласованию между задержанным тактовым сигналом и данными ведомого устройства. Добавление запаса по времени с учетом этих изменений во временных соотношениях приведет к необходимости дальнейшего уменьшения тактовой частоты SPI.

Применение дополнительной быстродействующей оптопары для гальванической развязки интерфейса SPI вызывает не только существенное удорожание проекта, но и значительно увеличивает занимаемую площадь на печатной плате, поскольку данные устройства обычно выпускаются в одноканальном варианте в корпусе SO8, а всего требуется пять каналов. Потребляемый ток, необходимый для работы изолированного интерфейса, может достигать 20 мА на канал.

Гальваническая развязка при помощи цифровых изоляторов

В последнее десятилетие появилось новое поколение цифровых изоляторов. Эти компоненты обладают большей степенью интеграции, повышенным быстродействием, меньшей задержкой распространения, меньшим расхождением временных соотношений и меньшими искажениями. Рассмотрим четырехканальный цифровой изолятор с тремя каналами, работающими в прямом направлении, и одним каналом, действующим в обратном направлении, который представляет собой компактное решение для гальванической развязки четырехпроводной шины SPI. Аналогично примеру с оптопарами зададимся следующими временными параметрами из технического описания: минимальная длительность импульса 11,1 нс (90 Мбит/с), максимальная задержка распространения (t_{PISO}) 32 нс, максимальное искажение длительности

импульса (PWD) 2 нс и максимальное расхождение задержки распространения от компонента к компоненту (t_{PSK}) 10 нс. В отличие от одноканальных оптопар в четырехканальном цифровом изоляторе необходимо также учитывать межканальное рассогласование между парой каналов, работающих в противоположных направлениях. Для рассматриваемого в примере компонента этот параметр (t_{PSKOD}) равен 5 нс.

Выбрав те же значения, типичные для задержек на рис. 3, получаем, что длительность половины периода тактового сигнала при гальванической развязке шины с использованием цифрового изолятора будет больше либо равна:

$$t_{TRACE} + t_{SLAVE} + t_{MASTER} + 2t_{PISO} = 70 \text{ нс},$$

что эквивалентно максимальной тактовой частоте 7 МГц. Как и в случае с оптопарой, мы видим, что скорость интерфейса SPI сильно ограничена задержкой распространения изолятора. В то же время цифровые изоляторы, которые производятся по стандартной технологии КМОП, обладают высокой стабильностью временных характеристик на протяжении всего срока службы продукта. Это позволяет нам выбирать тактовую частоту SPI без большого запаса на изменения временных характеристик.

Для реализации задержанного тактового сигнала в соответствии с рис. 4 необходим как минимум один дополнительный высокоскоростной канал гальванической развязки. Пропускная способность интерфейса SPI, опять же, будет зависеть от рассогласования между каналами тактового сигнала и данных, а также от искажений формы импульсов в них. При условии, что временные характеристики всех каналов близки, новое минимальное значение длительности половины периода тактового сигнала SPI составит:

$$t_{TRACE} + t_{SLAVE} + t_{MASTER} + 2PWD + t_{PSK} + t_{PSKOD} = 25 \text{ нс},$$

а максимальная тактовая частота будет равна 20 МГц.

Во многих приложениях МК только получает данные от АЦП, но не передает ему ничего. В таких трехпроводных шинах SPI для гальванической развязки сигналов интерфейса и задержанного тактового сигнала может быть использован один четырехканальный цифровой изолятор с двумя работающими в противоположных направлениях парами каналов. В подобных случаях длительность половины периода тактового сигнала SPI будет больше либо равна:

$$t_{TRACE} + t_{SLAVE} + t_{MASTER} + 2PWD + 2t_{PSKOD} = 20 \text{ нс},$$

а максимальная тактовая частота возрастает до 25 МГц.

Несмотря на то, что цифровые изоляторы обладают гораздо лучшими быстродействием и согласованием временных характеристик по сравнению с оптопарами, любые межканальные рассогласования и искажения по-прежнему будут ограничивать максимальную возможную тактовую частоту SPI. При применении дополнительного изолятора для задержанного тактового сигнала потребляемая мощность возрастает примерно от 20 до 25%. Таким образом, использование обычных цифровых изоляторов приведет к увеличению потребляемой мощности и площади на печатной плате, но опять же не даст в полной мере воспользоваться преимуществами подобной схемы.

Оптимизация реализации задержанного тактового сигнала в схеме с цифровыми изоляторами

Компанией Analog Devices был разработан цифровой изолятор, оптимизированный для обеспечения наилучших возможных характеристик в схеме с задержанным тактовым сигналом. ADuM3150 (рис. 6) — это представитель семейства высокоскоростных цифровых изоляторов SPIisolator, специально созданных для гальванической развязки шин SPI. Компонент генерирует задержанный тактовый сигнал, DCLK, без применения дополнительного канала изолятора. Сигнал DCLK формируется путем задержки входного тактового сигнала SPI на величину, равную полной задержке распространения через изолятор в прямом и обратном направлениях ($2t_{PI50}$). Блок-схема внутреннего устройства ADuM3150 изображена на рис. 6. Элемент задержки тщательно подстраивается при изготовлении компонента для согласования с внутренней задержкой распространения, за счет чего минимизируются рассогласования во времени между задержанным тактовым сигналом и возвращаемыми ведомым устройством данными. Рассогласование задержки не только существенно уменьшено, но и детально измерено в широком диапазоне рабочих условий и имеет гарантированную величину (параметр $DCLK_{ERR}$ в техническом описании).

Параметр $DCLK_{ERR}$ является мерой рассинхронизации задержанного тактового сигнала и данных ведомого устройства, а следовательно, его знак показывает, опережает или запаздывает задержанный тактовый сигнал по отношению к данным ведомого устройства. Поскольку задержанный тактовый сигнал используется для синхронизации приема данных в ведущем устройстве, желательно, чтобы он не приходил с опережением данных. Запаздывание DCLK относительно данных приемлемо до тех пор, пока оно не приводит к пропуску целого бита данных. В спецификации технического описания ADuM3150 указано, что $DCLK_{ERR}$ имеет допустимый диапазон от 3 до 8 нс, а значение $PWD = 3$ нс. При минимальном значении $DCLK_{ERR}$ и максимальном

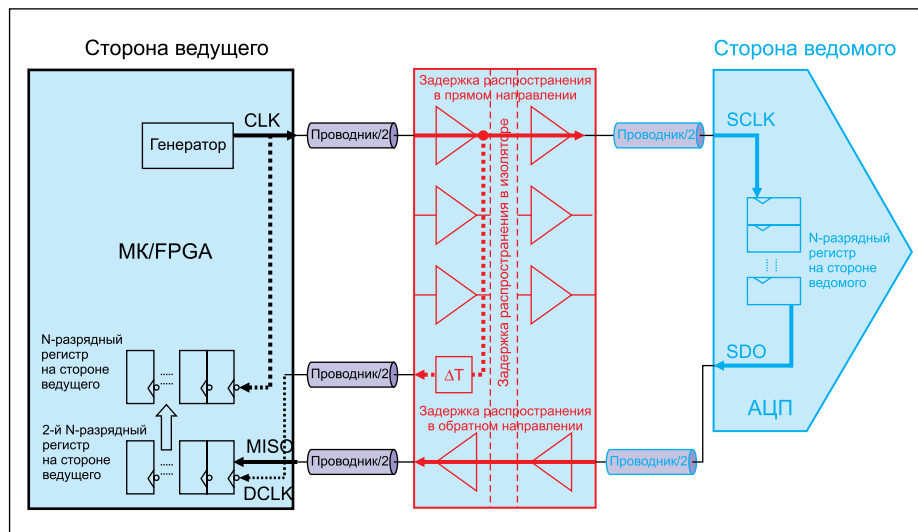


Рис. 6. Реализация задержанного тактового сигнала в изоляторе SPIisolator ADuM3150

Таблица. Результаты расчетов

Механизм задержки тактового сигнала	Источники основного вклада в t_{SKEW}	Максимальная скорость SPI, МГц	Примечания/Комментарии
Одноканальная оптопара 1 $t_{PI50} = 40$ нс	$PWD = 8$ нс $t_{PSK} = 20$ нс	6,25	Большая площадь на плате. Высокая потребляемая мощность. Временные характеристики изменяются в процессе эксплуатации. Высокая стоимость.
Одноканальная оптопара 2 $t_{PI50} = 20$ нс	$PWD = 2$ нс $t_{PSK} = 16$ нс	11,75	Большая площадь на плате. Высокая потребляемая мощность. Очень высокая стоимость. Временные характеристики изменяются в процессе эксплуатации.
Цифровой изолятор $t_{PI50} = 32$ нс	$PWD = 2$ нс $t_{PSK} = 10$ нс $t_{PSKOD} = 5$ нс	25	Умеренная/большая занимаемая площадь на плате в случае четырехпроводного интерфейса SPI. Высокая потребляемая мощность. Умеренная стоимость.
Цифровой изолятор с интегрированным задержанным тактовым сигналом ADuM3150 $t_{PI50} = 14$ нс	$PWD = 3$ нс $DCLK_{ERR} = 3$ нс	40	Не требует дополнительной площади на плате. Наименьшая потребляемая мощность. Минимальное t_{SKEW} за счет подгонки задержки при изготовлении. Гарантированное значение $DCLK_{ERR}$. Наименьшая стоимость.

значении PWD минимальная длительность половины периода тактового сигнала SPI равна:

$$t_{TRACE} + t_{SLAVE} + t_{MASTER} + (\min) |DCLK_{ERR}| + PWD = 12 \text{ нс,}$$

а максимальная частота тактового сигнала составляет 40 МГц. Максимальная скорость передачи данных ADuM3150 также равна 40 МГц, что позволяет достичь очень высокого быстродействия без какого-либо увеличения габаритов, стоимости и потребляемой мощности, вызываемой применением дополнительного канала изолятора.

Заключение

Для того чтобы извлечь выгоду из дискретизации и расширить динамический диапазон в схемах с датчиками, необходимо достаточно высокое отношение частоты дискретизации к частоте сигнала, которое позволило бы добиться значительного сокращения шума. Представленная в статье схема с задержанным тактовым сигналом потенциально способна обеспечить повышение пропускной способности изолированного интерфейса SPI и частоты дискретизации при

использовании различных существующих технологий гальванической развязки. Метод цифровой гальванической развязки дает существенные преимущества по сравнению с решением на базе оптопар благодаря более жесткому контролю межканального рассогласования и искажений. Компания Analog Devices пошла дальше в развитии этой технологии и выпустила специально для интерфейса SPI оптимизированный изолятор — ADuM3150, формирующий задержанный тактовый сигнал без сопутствующего представляющим методом и технологическому росту потребляемой мощности, габаритов и стоимости. Подобное решение позволяет пересылать данные через изолированный порт SPI с частотой до 40 МГц и делает возможной работу с быстродействующими АЦП, обладающими частотой дискретизации до 1 MSPS. ADuM3150 является представителем семейства цифровых изоляторов с высокой степенью интеграции и большим количеством каналов, разработанных специально для SPI. Это семейство также включает изоляторы ADuM3151/ADuM3152/ADuM3153 и изолятор ADuM3154, который поддерживает одновременную работу с несколькими изолированными ведомыми устройствами. ■