

Преодоление ограничений медных технологий интеграцией FPGA и оптических приёмопередатчиков

Владимир Вычужанин (г. Одесса, Украина)

В статье описывается, как с помощью встроенного в FPGA оптического интерфейса преодолеваются свойственные медным и традиционным оптическим технологиям ограничения на пропускную способность соединений в компьютерах, системах хранения и коммуникационной инфраструктуре при скорости передачи данных более 10 Гбит/с и расстояниях, превышающих 100 м.

Известной проблемой, возникающей при коммутациях электронных элементов на печатных платах, выполненных на основе меди, является потеря передаваемых данных. Объясняется это тем, что медные технологии зависят от частоты передачи данных, которые масштабируются при скоростях менее 16 Гбит/с.

Например, в широко используемых печатных платах на текстолите FR-4 с верхним медным слоем при передаче данных потери составляют 0,5...1,5 дБ/В на частоте Найквиста 5 ГГц (при скорости передачи данных 10 Гбит/с). На частоте Найквиста 12,5 ГГц (при скорости передачи данных 25 Гбит/с) потери возрастают до 2,0...3,0 дБ/В. Возвратные потери и перекрёстные помехи также растут с увеличением частоты передаваемых данных. На рисунке 1 в качестве примера показаны потери и перекрёстные помехи, возникающие в канале PCI Express сервера в зависимости от частоты передачи данных.

На частоте передачи данных 8 ГГц (16 Гбит/с) вносимые потери равны

60 дБ, т.е. находятся за пределами выравнивания динамического диапазона – кодирования данных без возвращения к нулю, соответствующего 40 дБ. Для компенсации потерь требуется использование дополнительных устройств, таких как ретрансляторы. Их применение приводит к увеличению потребляемой мощности, сложности и стоимости исходных устройств.

Кроме того, в системах, основанных на медных технологиях, необходимо компенсировать вносимые и возвратные потери и перекрёстные помехи, возникающие в результате искажений передаваемых данных из-за межсимвольных помех и неустойчивой синхронизации. Для их уменьшения и обеспечения необходимого коэффициента ошибок (скорости битовых ошибок) менее 10^{-12} BER используются опережающие или непрерывные во времени линейные эквалайзеры, а также эквалайзеры с адаптивной обратной связью, реализованные обычно на передатчике или приёмнике с медны-

ми каналами. Увеличение скорости передачи данных при использовании таких эквалайзеров приводит к росту вносимых и возвратных потерь и перекрёстных помех, для компенсации которых и обеспечения необходимой производительности требуются более мощные эквалайзеры, особенно с адаптивной обратной связью, что приводит к увеличению энергопотребления.

Другая проблема, связанная с использованием медных соединений, заключается в возникновении помех и потерь данных в транспортных линиях связи. При передаче данных на большие расстояния предъявляются высокие требования к каналам, а при использовании медных электрических проводников помехи могут быть весьма значительными. Тем не менее, 10G-соединения на основе медных технологий в настоящее время используются (например, стандарт 10GBASE-CX4). В соответствии со стандартом обеспечивается передача данных по четырём экранированным витым парам в каждом направлении (всего восемь витых пар). Такой кабель получается достаточно громоздким (около 10 мм в диаметре) и дорогим в производстве и может применяться только для передачи данных до 15 м.

Общим недостатком для всех 10G-соединений, базирующихся на медных проводниках, является высокий уровень потребления энергии. Например, в соот-

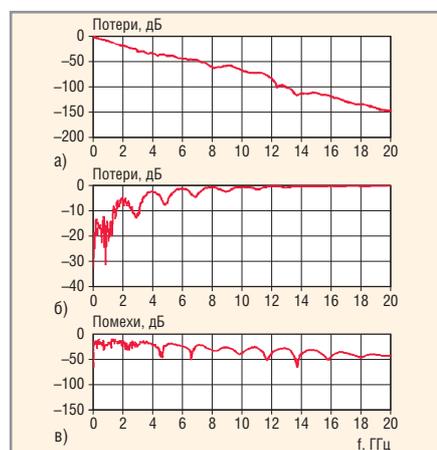


Рис. 1. Потери и перекрёстные помехи

а – вносимые потери, б – возвратные потери, в – перекрёстные помехи для PCI Express Server Channel

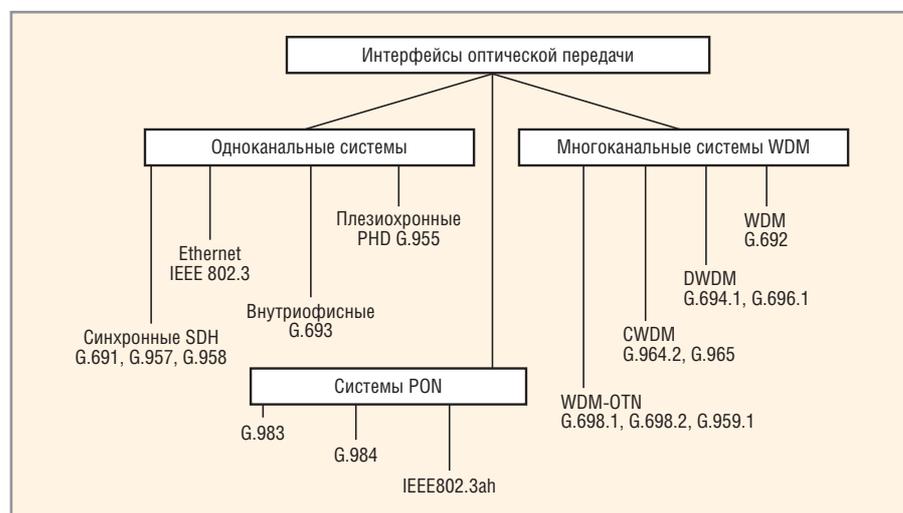


Рис. 2. Общая классификация оптических интерфейсов

ветствии со стандартом 10GBASE-T обеспечивается передача данных на расстоянии от 55 до 100 м, но из-за сложной обработки сигналов потребляется от 8 до 15 Вт на каждый порт. Если рассмотреть стандарт, в соответствии с которым обеспечивается передача данных на расстояние порядка 30 м, то такое соединение будет потреблять не менее 4 Вт на каждый порт. Применение стандартов сопровождается высоким энергопотреблением, существенным увеличением стоимости обслуживания соединений, а также вынуждает разработчиков уменьшать плотность размещения портов на передних панелях интерфейсов. Например, энергопотребление в диапазоне 8–15 Вт на каждый порт ограничивает плотность размещения портов до 8 штук (и менее) на той же площади, на которой можно разместить до 48 портов, применяя стандарт 1000 BASE-T или 1G-соединение, но уже на базе оптоволоконного.

Сегодня разработчики используют медные линии связи для передачи сигналов в основном на расстояния до 10 м. На расстояниях, превышающих 10 м, например для 10-гигабитных приложений, надо выбирать оптоволоконные системы связи [1–3]. Обусловлено это тем, что оптоволоконные системы связи имеют ряд существенных преимуществ не только перед системами с медным кабелем, но и перед системами, использующими витую пару. К таким преимуществам относятся: широкая полоса пропускания (несущая частота составляет 10¹⁴ Гц, что позволяет увеличить поток передаваемых данных по одному оптоволокну до нескольких терабит в секунду); малое затухание светового сигнала в волокне (0,2–0,3 дБ на длине волны 1,55 мкм в расчёте на 1 км, что позволяет строить линии протяжённостью до 100 км); высокая защита от помех (диэлектрический материал, из которого изготавливается оптоволокно, делает его невосприимчивым к электромагнитным помехам); недоступность для несанкционированного использования.

В отличие от медных интерфейсов оптоволокно практически не имеет потерь. Так, несколько одномодовых оптоволокон (MMF) имеют потери 3 дБ/км и 1 дБ/км при длинах волн 850 нм и 1300 нм соответственно. Одномодовое волокно (SMF) имеет потери 0,4 дБ/км и 0,25 дБ/км при длинах волн 1300 нм и 1550 нм соответственно. Из-за большого ядра (50 мкм) MMF является менее дорогостоящим, чем SMF (9 мкм) и обладает пропускной способностью 2 Гбит/с.

SMF дороже, но имеет большую пропускную способность 100 Гбит/с. В качестве источника света в MMF используется обычный светоизлучающий диод или поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором. MMF обычно применяется для передачи данных на расстояния меньше 1 км, а SMF – для передачи данных на расстояния от 1 км до тысяч км. В отличие от медной электрической связи энергопотребление и нестабильность оптической линии являются относительно независимыми от расстояния. Кроме того, оптический сигнал устойчив к электрическим помехам, отсутствуют амплитудные помехи. В случае использования мультиплексирования с разделением по длине волны несколько каналов могут быть реализованы на одном оптоволоконном канале, что позволяет снизить стоимость.

Для построения высокопроизводительных систем передачи данных рекомендуется применять многоканальные оптоволоконные соединения. Они обеспечивают необходимую низкую плотность оптических волокон, приемлемые размеры кабелей и решают проблему «затора каналов», характерную для одноканальных соединений. Из существующих средств передачи данных по многоканальным оптоволоконным соединениям наиболее распространённым является активный оптический кабель.

Разработчики многоканальных оптоволоконных соединений стремятся получить высокую плотность каналов при низком уровне потерь и перекрёстных помех. Уровень перекрёстных помех, т.е. максимальная сила влияния каналов друг на друга, определяется характеристиками оптических волокон и расстояниями между ними. Очевидно, что чем больше расстояние между оптическими волокнами, тем меньше плотность многоканального оптоволоконного соединения. Уровень потерь за-



Рис. 3. FPGA с оптическим интерфейсом

висит от характеристик оптических волокон и дальности передачи сигнала. Таким образом, при проектировании многоканального оптоволоконного соединения важно учитывать и оптимизировать все перечисленные выше параметры.

В настоящее время появилась также тенденция применять оптоволокно вместо медных проводников для передачи данных на расстояния менее 10 м, что позволяет преодолеть недостатки, присущие медной электрической связи. Структурированные кабельные системы связи для 10-гигабитных приложений на расстояниях до 90 м в фиксированном сегменте и до 100 м в канале успешно реализуются в оптоволоконной среде, что подтверждено стандартами TIA/EIA-568-C и ISO/IEC 11801.

Существующее разнообразие оптических интерфейсов, использующих в транспортных сетях оптоволоконные кабельные системы связи, обусловлено развитием технологий передачи данных и внедрением новых компонентов: перестраиваемых лазеров; оптических усилителей; компактных компенсаторов дисперсии; процессоров FEC и т.д. В качестве стандартов на оптические интерфейсы применяются рекомендации ITU-T и IEEE 802.3. Оптические интерфейсы можно разделить на три группы (см. рис. 2):

1. Одноканальные – обеспечивающие передачу данных только на одной оптической частоте (G.955, G.957, G.691, G.693, IEEE 802.3 u,z);

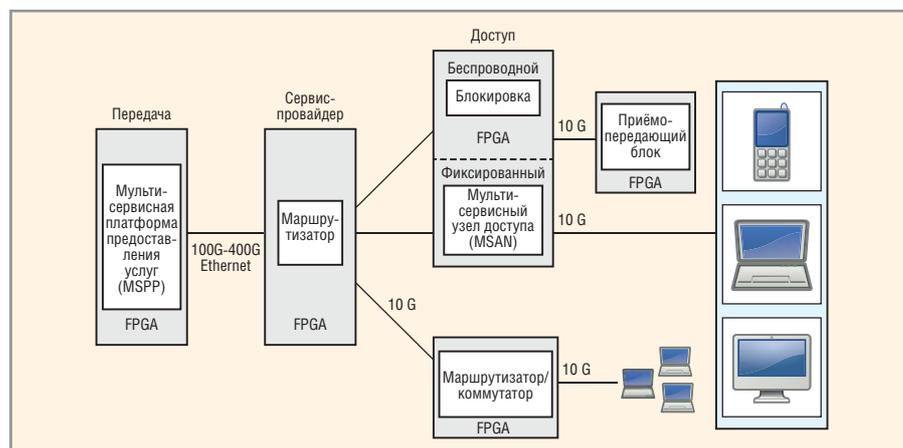


Рис. 4. Схема связи FPGA с трансиверами в оптическом интерфейсе

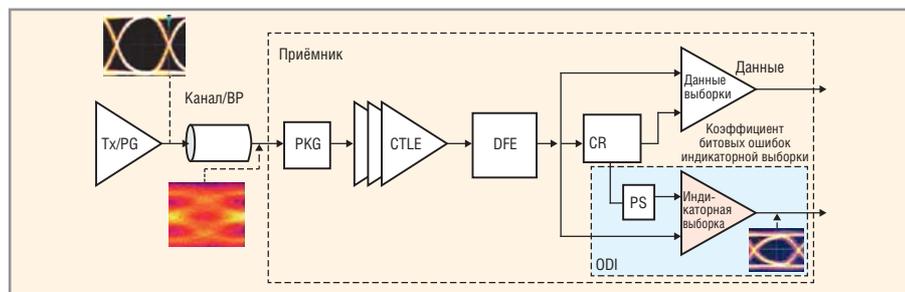


Рис. 5. Расширенная технология трансивера за счёт FPGA

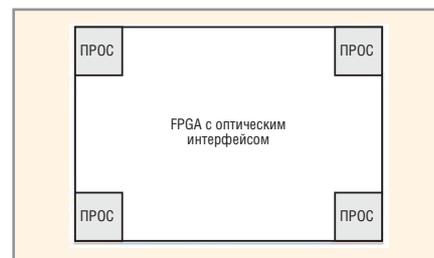


Рис. 6. Блок-схема FPGA с оптическими интерфейсами

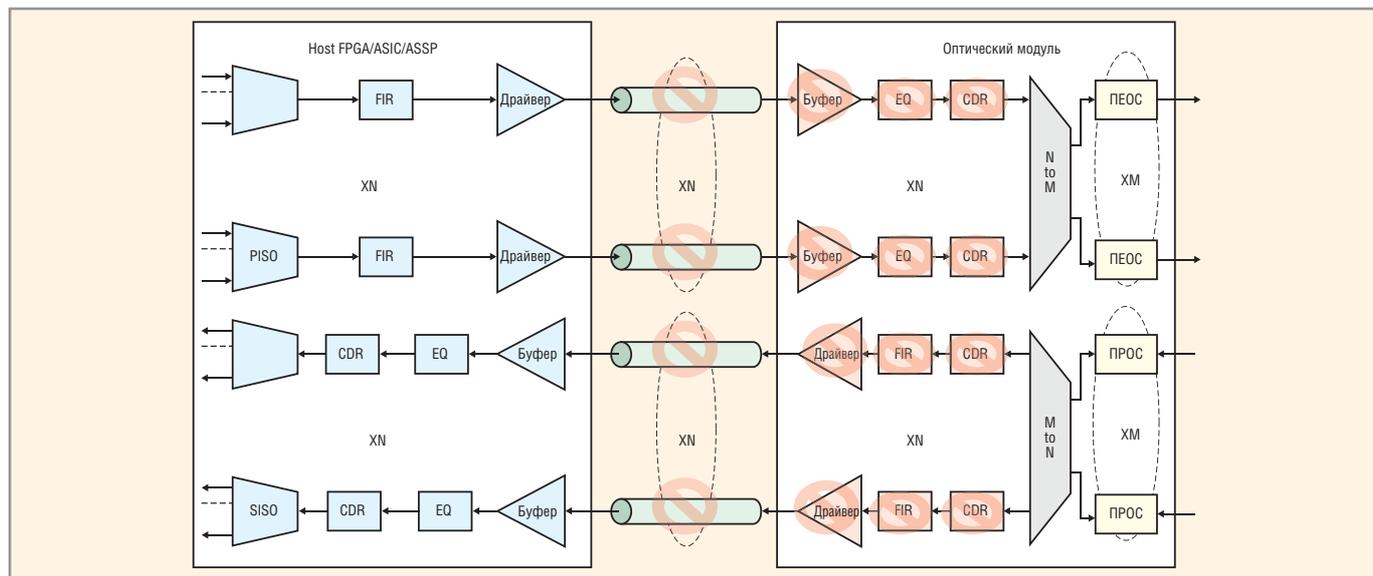


Рис. 7. Замена чип-модуля FPGA с оптическим интерфейсом

- Многоканальные – обеспечивающие передачу на двух и более оптических частотах одновременно (G.692, G.694.1, G.694.2, G.695, G.696.1, G.696.2, G.698.1, G.698.2, G.959.1, G.959.2);
- Оптические интерфейсы пассивных оптических сетей (PON), поддерживающие передачу оптических сигналов на одной, двух, трёх и более оптических частотах (G.983, G.984, G.985, IEEE 802.3ah).

При передаче данных актуальным является снижение временной задержки их передачи в сетевых устройствах с высокой пропускной способностью и связанных с ними приложениях, например для смартфонов, планшетов, телевидения высокой чёткости, компьютеров. Сетевые устройства включают серверы, маршрутизаторы, коммутаторы, системы хранения данных, рейды-переключатели, глобальные сети, оптические переключатели передающих систем. Для высокоскоростной передачи данных

применяются каналы, обеспечивающие связь со скоростью порядка 10 Гб/с, так называемые 10G-соединения.

В каналах связи с высокой пропускной способностью (100 GbE) на основе оптических соединений при передаче данных в компьютеры центров обработки начинают использоваться программируемые логические интегральные схемы (FPGA). Фирмой Altera путём интеграции FPGA с лазерной техникой разработан оптический интерфейс Optical FPGA (см. рис. 3), преодолевающий ограничения медных соединений и обеспечивающий повышение пропускной способности, снижение сложности, энергопотребления и стоимости устройства [4].

Реализация технологии Optical FPGA базируется на интеграции ПЛИС в одном корпусе с оптическими трансиверами и позволяет преодолеть ограничения, свойственные не только медным, но и традиционным оптическим технологи-

ям. Интеграция FPGA с оптическим интерфейсом до минимума сокращает путь передачи данных от трансивера до программируемой логической интегральной схемы, увеличивает пропускную способность соединений, уменьшает степень сложности, энергопотребление и стоимость. В результате уменьшается деградация данных и джиттер, повышается целостность данных, снижается уровень ошибок, вызванных паразитными элементами в тракте передачи данных. Такая интеграция сокращает время разработки устройства и расходы. Система работает с трафиком 100 GbE, состоящим из пакетов разного размера. Коэффициент ошибок при передаче данных в кристалл и из кристалла не превышает 10^{-12} . К достоинствам интеграции следует отнести наличие средств мониторинга температуры модуля и тока смещения лазера, что позволяет обнаруживать отклонения и предотвращать потерю соединения. Это особенно важно для вычислительных центров, где сбой в работе приложения может привести к существенным финансовым потерям. Следует отметить наличие хорошего теплоотвода от FPGA с интегрированными оптическими модулями, который позволяет обеспечить работу оптических компо-

Таблица. FPGA с интегрированными трансиверами

Устройство	Максимальное количество каналов	Скорость передачи данных (Гбит/с)	Наличие оптического модуля
Stratix V GT (28 нм)	36	28,05	Есть
Stratix V GX (28 нм)	66	14,1	Есть
Stratix IV GT (40 нм)	48	11,3	Есть
Stratix IV GX (40 нм)	48	8,5	Есть

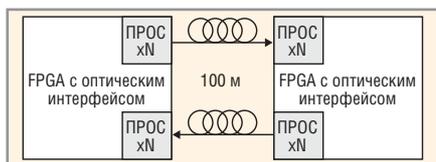


Рис. 8. Оптические приложения FPGA

ментов в допустимом диапазоне температур – от 0 до +70°C.

В оптическом интерфейсе рекомендуется использовать обладающую низким джиттером FPGA Stratix V GT на 28 нм с трансиверами (см. табл.) для управления оптическими модулями со встроенной электронной компенсацией дисперсии (EDC) на основе фазовой автоподстройки частоты (PLL).

Схема связи FPGA с трансиверами для передачи данных с помощью оптического интерфейса приведена на рисунке 4. Расширенная технология трансивера за счёт свойств FPGA обеспечивает электрическую функциональность передачи и приёма данных до 28 Гбит. Передатчик (TX) обладает низким джиттером, достигающим 300 фс на 28 Гб, за счёт использования LC-генератора (см. рис. 5). В приёмнике (RX) обеспечивается 20 дБ усиления переменного тока с регулируемой пиковой частотой и автоматическим подбором коэффициентов усиления.

Используемый трансивер обладает полосой пропускания несколько сотен МГц, дрожание глазковой диаграммы более 40 дБ/декада. Встроенные индикаторы дефектов на выходе устройства определяют коэффициент ошибок при передаче данных в контуре и показывают глазковую диаграмму.

На рисунке 6 показана блок-схема FPGA с оптическими интерфейсами, обеспечивающая непосредственную передачу и приём оптического сигнала без необходимости использования дискретного оптического модуля.

Дуплексный режим передачи данных реализуется размещением на концах системы передающих (ПЕОС) и принимающих (ПРОС) оптических компонентов, которыми управляет FPGA. При необходимости дуплексный режим может быть отключён. В этом случае передача данных будет осуществляться только в одном направлении. Когда электрический сигнал поступает через порт на соответствующие выводы электрического коннектора, он преобразовывается драйвером лазера и электронно-оптическим преобразователем ПЕОС в оптический сигнал. Этот сигнал передаётся по оптоволокну к ПРОС, где преобразуется обратно в электрический сигнал. Получен-

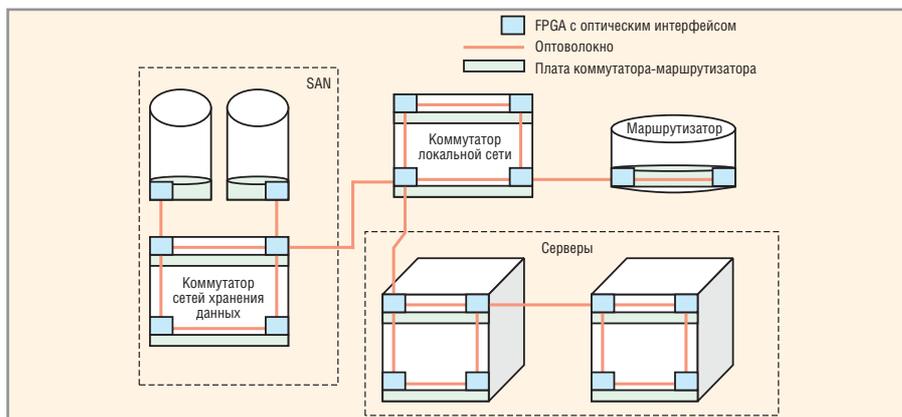


Рис. 9. FPGA с оптическими интерфейсами для центра обработки данных

ный сигнал поступает на вывод коннектора и далее в электрический порт.

При разработке устройств можно заменить чип-модуль системы на FPGA с оптическим интерфейсом, что позволит уменьшить энергозатраты, сократить расходы, а также увеличить плотность портов (см. рис. 7). Приложение, включающее оптический интерфейс для FPGA, показано на рисунке 8. FPGA с оптическим интерфейсом можно использовать не только в оптических платах, но и при передаче данных от платы к плате, от стойки к стойке, от системы к системе на расстояниях от 0,3 м до 100 м и скорости 10 Гбит/с.

Пример использования FPGA с оптическим интерфейсом в центре обработки данных приведён на рисунке 9. На нём представлена корпоративная сеть, включающая коммутаторы, маршрутизаторы, серверы, дисковые массивы, системы хранения данных (серверы услуг, базы данных).

FPGA с оптическим интерфейсом могут быть использованы для передачи данных в телекоммуникационных системах, в военных сетях, в центрах обработки данных, а также в контрольно-измерительных и медицинских устройствах. Эта технология позволяет обеспечить энергоэффективную работу систем на требуемых расстояниях с максимальной плотностью передаваемых данных, заданным форм-фактором и с наименьшими перекрёстными помехами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фокин В.Г. Оптические системы передачи и транспортные сети. – М.: Эко-Трендз, 2008.
2. Фриман Р. Волоконно-оптические сети. 3-е издание. – М.: Техносфера, 2007.
3. Никульский И.Е. Оптические интерфейсы цифровых коммутационных станций и сети доступа. – М.: Техносфера, 2006.
4. www.altera.com.

