

ТЕХНОЛОГИЯ СИНХРОНИЗАЦИИ ETHERNET-СЕТИ

СЛОБОДАН МИЛЬЕВИЧ (SLOBODAN MILIJEVIĆ), ст. инженер по применению, Zarlink Semiconductor

За последние два десятилетия Ethernet стала доминирующей технологией передачи данных, особенно в телекоммуникационных и беспроводных сетях поставщиков услуг благодаря своей простоте и низкой стоимости. Однако асинхронная природа этой технологии вызывает определенные трудности передачи данных. В статье, являющейся авторизованным переводом [1], рассматриваются основные характеристики сети Synchronous Ethernet, концепции по синхронизации и требования, а также некоторые общие проблемы, с которыми сталкиваются разработчики печатных плат при использовании SyncE.

Такие услуги по мультиплексной передаче с временным разделением каналов (Time Division Multiplexing — TDM) как T1/E1 и SONET/SDH требуют синхронизации между источником и узлом назначения. Аналогично, беспроводные базовые станции требуют синхронизации с основными часами, чтобы обеспечить непрерывную передачу управления между соседними ячейками.

Несмотря на то, что существует несколько способов для установления синхронизации по Ethernet-сети, все они построены на основе стандарта Synchronous Ethernet (SyncE). В SyncE применяется интерфейс физического уровня для межузловой синхронизации, которая осуществляется так же, как в технологиях SONET/SDH или T1/E1. Это обстоятельство вселяет в поставщиков беспроводных услуг уверенность, что сети на базе SyncE не только окажутся экономичными, но и будут обладать высокой надежностью, как сети на базе SONET/SDH или T1/E1.

SyncE представляет собой стандарт распределения частот по каналам Ethernet. Другие стандарты, например IEEE Std. 1588 Precision Time Protocol (PTP), IETF Network Time Protocol (NTP) и т.д. были разработаны и продолжают совершенствоваться с целью обеспечить высокое качество разделения каналов во времени и удовлетворить требованиям ACR (Adaptive Clock Recovery — адаптивное восстановление тактовой синхронизации).

По мере роста интереса со стороны операторов и провайдеров услуг многие поставщики оборудования разрабатывают оборудование с возможностями SyncE для этого нового доходного рынка. Однако разработчикам Ethernet-оборудования часто не хватает глубокого понимания вопросов синхронизации, из-за чего они недооценивают сложность этой задачи. Обычно считается, что синхронизация

по Ethernet-сети достигается путем замены несинхронизированного кварцевого генератора, используемого для устройств физического уровня (PHY) Ethernet, устройством общего назначения PLL (Phase Locked Loop — система фазовой автоподстройки частоты, ФАПЧ).

Разумеется, это неверное предположение и основанные на нем проекты обречены на провал.

СИНХРОНИЗАЦИЯ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ

Синхронизация — определяющее требование для функционирования систем связи. Эти системы базируются на TDM-технологиях (T1/E1 и SONET/SDH), которые наилучшим образом подходят для передачи трафика с постоянной скоростью, например оцифрованных голоса и видео. TDM-технологии позволяют получить небольшую задержку передачи при малых отклонениях от этого значения — два основных параметра, обеспечивающих требуемое качество сигнала.

Малая задержка передачи сигнала достигается только при условии минимальной буферизации данных в каждом узле. Это значит, что все узлы в TDM-сети должны быть жестко синхронизированы с задающим генератором, чтобы предотвратить потерю данных. Если у какого-то узла несколько другая частота даже в течение небольшого времени, его буфер либо переполнится, либо опустошится, и выборки данных потеряются или повторятся для поддержания постоянной скорости передачи. Синхронизация сети в системах связи основана на иерархии, в которой самая верхняя позиция отведена опорному генератору с наивысшей точностью (см. рис. 1).

Иерархическую верхушку занимает первичный опорный генератор PRC/PRS (Primary Reference Clock, или

Primary Reference Source) с точностью 10^{-11} , означающей, что на каждые 10^{11} импульсов синхросигнала приходится на один импульс больше или меньше по сравнению с идеальным синхросигналом. Наручные часы при такой точности ошибались бы на 1 с каждые 10^{11} с (3172 года).

Радиосигналы PRC/PRS поступают от цезиевых (атомных) часов систем глобального позиционирования GPS, ГЛОНАСС и LORAN-C.

Следующий уровень иерархии отведен блоку синхронизации SSU (Synchronization Supply Unit, или Building Integrated Timing Supply (BITS)). SSU/BITS имеет функцию переключения генератора в режим удержания, которая позволяет этому блоку генерировать синхросигнал с более высокой точностью, чем его собственная точность в автономном режиме в течение короткого времени после потери синхронизации с генератором PRC/PRS. Блок SSU/BITS обычно реализуется совместно с цифровой системой фазовой автоподстройки частоты (DPLL), управляемой с помощью рубидиевых часов.

Третий уровень иерархии занимает блок внутренних часов SEC (SDH — SDH Equipment Clock), или блок SONET Minimum Clock (SMC). SEC/SMC также снабжен функцией переключения генератора в режим удержания, но ее параметры и характеристики автоном-

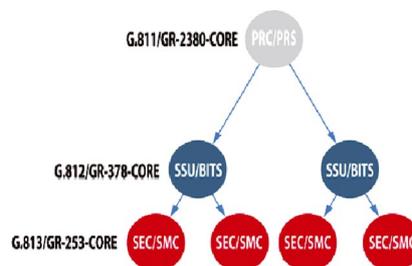


Рис. 1. Синхронная цифровая иерархия сети SDH/SONET

ного режима хуже требуемых для SSU/BITS. SEC/SMC, как правило, имеет цифровую систему ФАПЧ, которая управляется термостатированным кварцевым генератором (ТСХО). Следует заметить, что у всех уровней иерархии начиная со второго и ниже точность синхронизации равна точности блока PRC/PRS. У каждого поставщика услуг связи имеется собственный блок PRC/PRS, и это значит, что глобальная сеть связи состоит из синхронизированных участков, соединенных с помощью плезеохронных (почти синхронных) звеньев.

Из соображений надежности едва ли можно ожидать, что глобальные сети связи будут синхронизироваться только с блоком PRC/PRS. На практике они используют структуру разделения каналов по времени наряду с независимо работающими блоками PRC/PRS. У каждого поставщика услуг связи имеется собственный блок PRC/PRS, и это значит, что глобальная сеть связи состоит из синхронизированных участков, соединенных с помощью плезеохронных (почти синхронных) звеньев.

Если блоки PRC/PRS и SSU/BITS обычно реализуются как автономные элементы, предназначенные только для синхронизации (не для передачи данных), то SEC/SMC являются исключительно частью сети, как например мультимплексор ввода/вывода.

ТРАДИЦИОННЫЕ И СИНХРОНИЗОВАННЫЕ ETHERNET-СЕТИ

Традиционная Ethernet-сеть изначально предназначалась для передачи асинхронного трафика данных, т.е. требования к прохождению сигнала синхронизации от источника к приемнику не выдвигались. В действительности, старая 10-Мбит/с (10Base-T) Ethernet-сеть была не в состоянии передавать этот сигнал по интерфейсу физического уровня, т.к. использовавшийся в ней передатчик 10Base-T прекращал передачу сигнала в интервалах не занятости.

Передатчик 10Base-T каждые 16 мс отправлял единичный импульс, уведомлявший приемную сторону о своем присутствии. Разумеется, таких редких импульсов недостаточно для установления синхронизации после сбоя

на приемнике. Интервалы не занятости в более быстрых разновидностях Ethernet-сетей (100 Мбит/с, 1 и 10 Гбит/с) постоянно регистрируются при появлении фронта импульса, что позволяет непрерывно и с высоким качеством восстанавливать тактовую синхронизацию на приемнике. Эти разновидности являются хорошими кандидатами для реализации синхронизированной Ethernet-сети.

На рисунке 1 схематически представлена сеть Gigabit Ethernet (1000Base-T) для передачи сигнала по медному проводу.

В Gigabit Ethernet с медным проводом используется линейное кодирование наряду с передачей по всем четырем парам кабеля CAT-5 для компенсации ограниченной ширины полосы витой пары этого кабеля. Передача осуществляется одновременно в оба конца, как это происходит в сетях ISDN и xDSL, где для подавления эха применяются алгоритмы цифровой обработки сигнала.

Подавление эха значительно упрощается в том случае, если частота, с которой передаются данные, одинакова в обоих направлениях. Это достигается в концепции master/slave (ведущий/ведомый) сети Gigabit Ethernet. Ведущий блок отправляет синхросигнал от независимого кварцевого генератора, а ведомый блок восстанавливает опорный тактовый сигнал из полученных данных и использует его для передачи собственных данных. Ведущий и ведомый блоки определяются в автопереговорном процессе. Ведущему блоку, как правило, назначается редко используемое случайное значение, но оно устанавливается и вручную.

Из рисунка 2 видно, что синхронизация действительно осуществляется в Ethernet на каждом сетевом сегменте между двумя соседними узлами, но она не распространяется от сегмента к сегменту. Таким образом, узел принимает тактовый сигнал, восстанавливает его, а затем пересылает всем передающим узлам (см. рис. 3).

Разумеется, восстановленный сигнал нуждается в очистке с помощью ФАПЧ, позволяющей устранить джиттер из цепи восстановления тактового сигнала до того, как он поступит на передающее устройство. Кроме того, необходимо вручную настроить порты в тракте передачи сигнала синхронизации, что делается для чередования функций ведущего и ведомого блоков (только для сети 1000Base-T).

В случае оптоволоконной сети Gigabit Ethernet (1000Base-X) или 10 Gigabit Ethernet (10GBASE) такая необходимость отсутствует, т.к. один волоконный тракт используется для передачи, другой — для приема (по одному оптоволокну сигнал передается только в одном направлении) и, следовательно, функции ведущего и ведомого узлов не требуются.

Любое устройство физического уровня сетей Gigabit Ethernet или 10 Gigabit Ethernet должно поддерживать синхронизированную Ethernet-сеть, обеспечивая восстановленный синхросигнал на одном из своих выходов. Восстановленный синхросигнал очищается с помощью системы ФАПЧ и передается на вход 25-МГц кварцевого генератора физического устройства. Несколько новых физических устройств Ethernet-сети обеспечивают специальный вывод для входного тактового сигнала. Преимуществом этого метода является то, что частота входного сигнала может быть выше 25 МГц — чем выше частота синхронизации, тем, как правило, меньше джиттер. Кроме того, данный метод позволяет избежать каких-либо потенциальных проблем, связанных с циклом синхронизации физического устройства.

ТРЕБОВАНИЯ К СИНХРОНИЗОВАННОЙ СЕТИ ETHERNET

Из сказанного можно сделать преждевременный вывод о том, что единственная функция системы ФАПЧ, используемой в технологии SyncE, заключается в очистке восстановленного сигнала от джиттера. Однако в

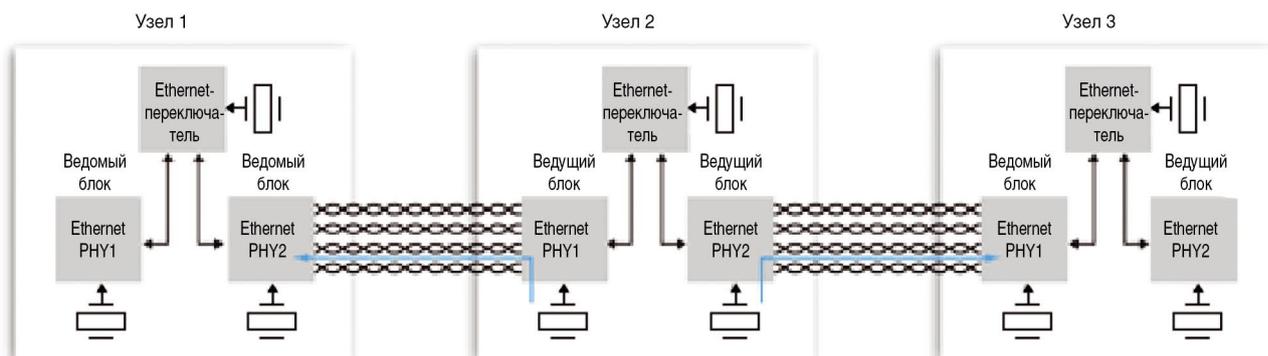


Рис. 2. Синхронизация на физическом уровне в традиционной Ethernet-сети

ЗАО СИНТЕЗ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

www.syntezmicro.ru

СЕРВИС И УСЛУГИ

- Услуги кремниевых мастерских (wafer foundry) за рубежом (Европа, США, Азия) «под ключ» для процессов Bipolar, Trench MOSFET, IGBT, CMOS, BiCMOS, BCD. SOI Rad Hard, MEMS с проектными нормами до 90 нм.

- Услуги сборки полупроводниковых приборов и ИС за рубежом для всех видов корпусов

- Поставка импортных материалов для электронной промышленности (керамические, металлостеклянные корпуса, выводные рамки, керамика, эпитаксиальные структуры и др.)
- Поставка импортного нового и использованного технологического, сборочного, тестового, испытательного, метрологического оборудования
- Поставка импортных активных электронных компонентов, в том числе чипов и Military

- Предоставление услуг российским дизайн-центрам по разработке полупроводниковых приборов и ИС для зарубежных заказчиков
- Экспорт конкурентноспособной продукции российских производителей

394007 г. Воронеж, Ленинский проспект д. 119В

Тел.: +7-(4732)-37-9101, факс: +7-(4732)-26-6057. E-mail: bodnar@syntezmicro.ru, bodnar@syntez.artn.ru

Отдел внешнеэкономических связей

Тел.: +7-(4732)-26-6057. E-mail: exim@syntezmicro.ru, yurzem@syntez.artn.ru

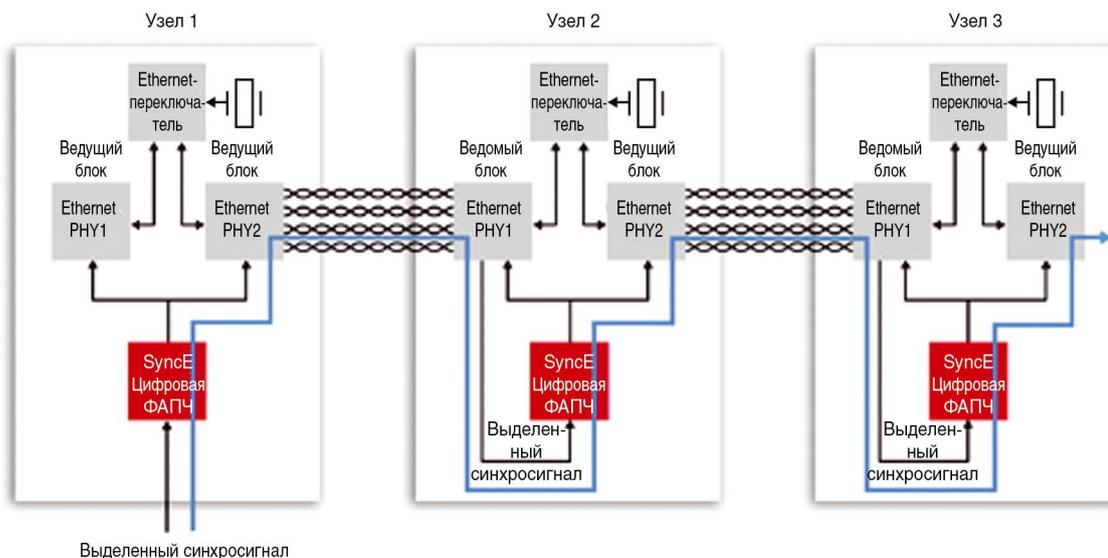


Рис. 3. Синхронизация на физическом уровне в Ethernet

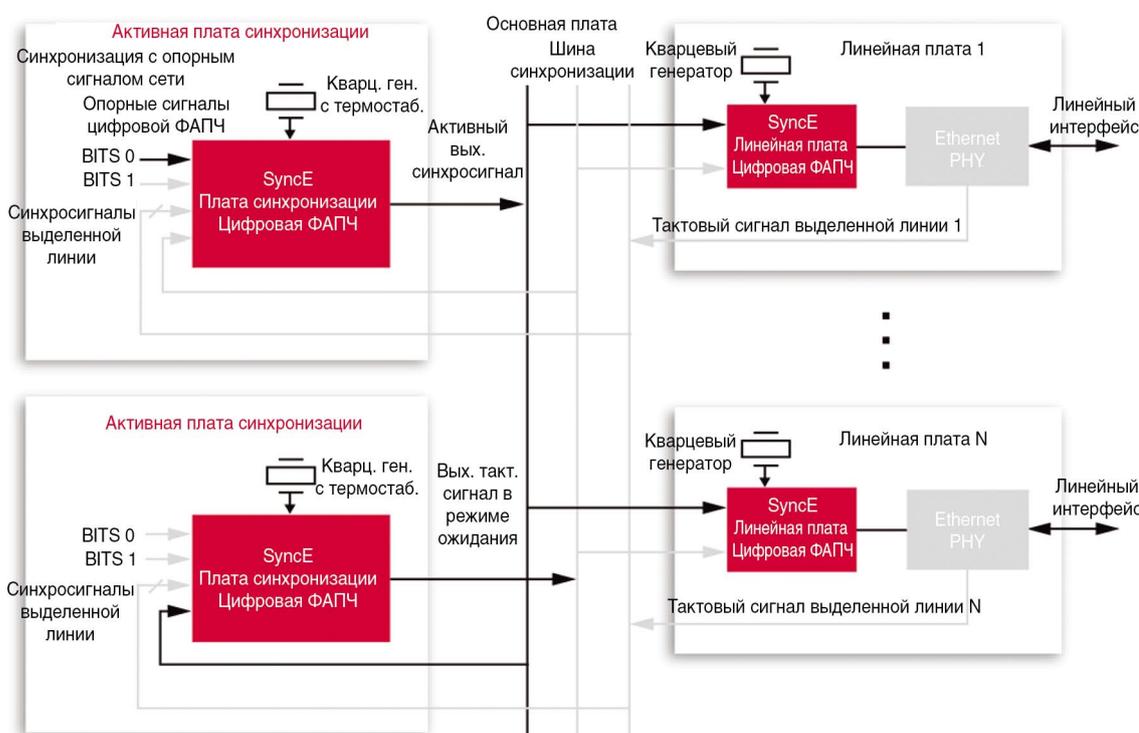


Рис. 4. Резервная синхронизация в SyncE-системе операторского класса

SyncE схема ФАПЧ должна обеспечивать и другие функции.

Например, если приемное устройство физического уровня (см. рис. 3, узел 2, PHY 1) отсоединилось от линии, восстановленная частота синхронизации перестанет или начнет дрейфовать, в зависимости от того, как реализована схема восстановления синхронизации после сбоя. ФАПЧ общего назначения не отследит этого большого изменения в частоте на передающем физическом устройстве (см. рис. 3, узел 2, физ. уровень 2), и в результате не только тактовый сигнал не будет передан, но и, возможно, не произойдет и передача данных.

Схема ФАПЧ в технологии SyncE должна обнаруживать сбой восстановленного сигнала синхронизации и уметь переключаться либо на другой хороший опорный сигнал системы, либо переключать генератор в режим удержания. Требования к SyncE кратко изложены в спецификации внутренних часов синхронной Ethernet-сети (ITU G.8262/Y1362). Эти требования основаны на спецификации ITU-T G.813 для тактовых сигналов стандарта SDH. Ниже перечислены основные требования ITU G.8262/Y1362.

– **Точность в автономном режиме:** точность выходного сигнала схемы ФАПЧ, когда она не управляется опор-

ным сигналом, должна быть равной или выше чем $\pm 4,6$ ppm в течение одного года. Это очень высокая точность относительно точности традиционной Ethernet-сети (± 100 ppm).

– **Режим удержания:** система ФАПЧ постоянно рассчитывает среднее значение частоты синхронизированного опорного сигнала. В случае если опорный сигнал не поступает, а также отсутствуют другие опорные сигналы, ФАПЧ переходит в режим удержания и генерирует выходной синхросигнал на основе расчетного среднего значения. Устойчивость режима зависит от разрешения усредняющего алгоритма и стабильности частоты генератора,

используемого в качестве задающего тактового генератора ФАПЧ.

– **Контроль за опорным сигналом:** система ФАПЧ должна постоянно контролировать качество входных опорных сигналов. Если оно ухудшается (сигнал исчезает, или дрейфует частота), блок ФАПЧ подает сигнал тревоги (прерывания) и переключается на другой действующий опорный сигнал.

– **Переключение опорного сигнала без паузы:** если ФАПЧ-система не обнаруживает опорного сигнала, она захватывает другой опорный сигнал. При этом фаза сигнала не изменяется.

– **Фильтрация джиттера и стабилизация дрейфа:** блок ФАПЧ можно рассматривать как фильтр для джиттера и средство стабилизации дрейфа. Чем уже ширина полосы петли, тем меньше джиттер и дрейф.

– **Устойчивость к джиттеру и дрейфу:** система ФАПЧ должна быть устойчивой к большому джиттеру и дрейфу на входе и поддерживать синхронизацию, не генерируя сигнала тревоги.

Эти жесткие требования можно удовлетворить только с помощью цифровой системы ФАПЧ (DPLL), схожей с той, которая используется для синхронизации сети SONET/SDH. Основное различие заключается в том, что система SyncE DPLL должна захватывать и генерировать тактовые частоты, используемые в Ethernet (25, 125 и 156,25 МГц), тогда как в SONET/SDH задействованы другие значения тактовых частот (19,44 и 155,52 МГц).

РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ SYNCЕ

SyncE-системы операторского класса должны обеспечивать высоконадежное функционирование при всех условиях. Для этого наиболее важные компоненты системы имеют некоторую избыточность, в т.ч. в отношении синхронизации.

Синхронизация в системе операторского класса реализуется с помощью двух плат, с которых тактовые сигналы поступают на несколько линейных плат через общую плату, как видно из рисунка 4. Все линейные платы синхронизируются с тактовым сигналом, поступающим с активной платы. Если, например, ее не подключили, линейные платы станут синхронизоваться с сигналом, поступающим с резервной платы. Переключение с одной платы синхронизации на другую не должно вызывать прерывания или сбоя в системе.

Две платы синхронизации обеспечивают защиту системы на случай отказа одной из них. Из рисунка 4 видно, что платы имеют возможность синхронизоваться от более чем одного опорного сигнала. Плата принимает

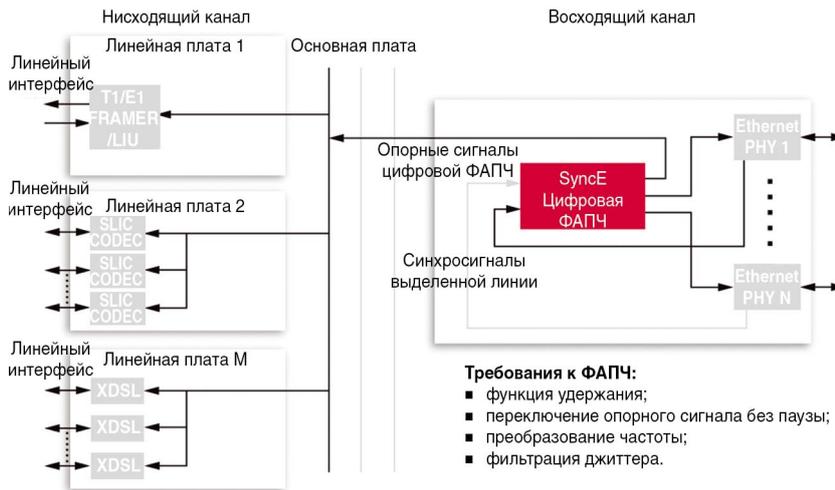


Рис. 5. Цифровой канал связи следующего поколения

опорные сигналы из нескольких источников, выбирает один из них, очищает от фазового шума с помощью цифровой ФАПЧ и передает линейным платам через общую панель. Цифровая схема ФАПЧ является наиболее важной составляющей платы синхронизации. Опорные сигналы цифровой ФАПЧ могут поступать извне с блока SSU/BITS, изнутри с линейных плат или от другой платы синхронизации в системе. Цифровая ФАПЧ платы синхронизации должна отвечать всем требованиям рекомендации ITU-T G.8262/Y1362.

Как видно из рисунка 4, каждая линейная плата оснащена схемой цифровой ФАПЧ, которая позволяет уменьшить джиттер и преобразовать частоту, например, 25-МГц тактового сигнала в один или более тактовый сигнал для Ethernet PHY с частотой 125, 156,25, 155,52 МГц и т.д.

Цифровая ФАПЧ линейной платы должна также обеспечить переключение без паузы между активным и резервным тактовым сигналом, например в случае, когда активный синхросигнал неожиданно исчезает, а система еще не обнаружила сбоя и не переключила цифровую схему ФАПЧ линейной платы на резервный опорный сигнал. Для цифровой ФАПЧ линейной платы, как и для любой другой схемы ФАПЧ, требуется кварцевый генератор.

Стоимость этого генератора невысока, т.к. для цифровой ФАПЧ линейной платы не требуется режим удержания (кроме коротких интервалов времени переключения с активного на резервный тактовый сигнал). В случае если этот режим занимает продолжительное время, система использует цифровую ФАПЧ платы синхронизации и потому ей необходимы кварцевые генераторы более высокого качества (ТСХО, ОСХО).

Малые SyncE-системы, которым не требуется резервная синхронизация, обычно имеют только одну цифровую схему ФАПЧ. Она должна удовлетворять всем требованиям как цифровой системы ФАПЧ платы синхронизации, так и цифровой ФАПЧ линейной платы. У этой ФАПЧ должна быть узкая ширина полосы петли, функция удержания высокого качества (требуется ТСХО или ОСХО), возможность переключения опорного сигнала без паузы и очень малый собственный джиттер. В зависимости от того или иного приложения, может также потребоваться, чтобы эта цифровая ФАПЧ генерировала такие частоты как 8 кГц; 2,048; 1, 544; 34,368; 44,736 МГц и т.д.

На рисунке 5 показан цифровой канал связи (Digital Loop Carrier, или ЦК) следующего поколения, работающих на тактовых частотах Ethernet-сети и телекома. Этот канал устанавливается таким образом, чтобы объединить трафик телефонных станций, линий xDSL и сетей T1/E1, свести к минимуму количество линий, идущих в центральный офис (ЦО), и увеличить скорость передачи данных по xDSL за счет укорачивания медных линий.

Совокупный трафик передается в ЦО по оптоволоконному кабелю или нескольким медным линиям. Традиционно, в ЦК для передачи данных между этим каналом и центральным офисом использовались технологии SONET/SDH или T3/E3. Однако эти каналы заменили Ethernet-сетью благодаря низким капитальным затратам и операционным расходам на ее реализацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Slobodan Milijevic. An introduction to Synchronized Ethernet// www.videsignline.com/showArticle.jhtml?articleID=215801063&cid=NL_vidl.