

СИНХРОНИЗАЦИЯ В БОЛЬШИХ И НЕОДНОРОДНЫХ СЕТЯХ SyncE

ИГОРЬ ИБРАГИМОВ, инженер

В статье рассматриваются методы синхронизации, применяемые в сетях SyncE. Подробно описываются требования, предъявляемые к отклонению сигналов.

SyncE, или синхронная сеть Ethernet (Synchronous Ethernet), представляет собой разновидность стандартной сети Ethernet. SyncE позволяет всем внутри-сетевым узлам работать синхронно, несмотря на существенную разницу в задержках распространения сигналов. Это достигается за счет передачи информации о частоте по физическому уровню Ethernet, который связан с опорным тактовым сигналом. Сеть SyncE получила широкое распространение не только в проводных, но и беспроводных сетях, поскольку она обеспечивает частотную синхронизацию в больших и распределенных сетях. По мере развертывания сетей 5G SyncE будет все шире применяться для обеспечения точного опорного сигнала.

ЭВОЛЮЦИЯ ETHERNET

Сети Ethernet отличаются низкой стоимостью и простотой. Именно эти

преимущества сделали их доминирующей средой передачи данных, когда произошел переход от голосовых сетей к IP-передаче. По мере увеличения объема пакетных данных сети SONET (synchronous optical networking) и SDH (synchronous digital hierarchy) были замещены сетями на основе Ethernet.

Сети IP/Ethernet имеют низкую стоимость, обеспечивают высокую емкость и сервисы нескольких типов в рамках одной сети. Однако у них имеется недостаток: классические сети Ethernet асинхронны, что недопустимо для качественной передачи голоса по IP, сотовой связи или сетей усовершенствованных датчиков, где требуется низкая задержка, а также для систем реального времени.

Для решения этой проблемы были разработаны сети SyncE, в которых сигналы линии на физическом уровне, которые использовались в системах

с временным разделением (TDM), заменены похожим, но синхронным тактовым сигналом, совместимым с протоколом Ethernet. В больших сетях с несколькими конечными точками сигнал синхронизации распространяется с центрального источника к главному опорному тактовому генератору PRC (primary reference clock) в отдаленные концы сети.

Сети SyncE поддерживают создание и распространение качественных опорных синхросигналов по проводным и беспроводным сетям. Ресинхронизация не требуется, поскольку синхронизирующий сигнал передается на физическом уровне вместе с данными. Заметим, что в SyncE возможна частотная синхронизация без передачи данных, когда информация о частоте передается между узлами. Такой подход отличается от временной синхронизации, в которой требуется передача не только частоты, но и фазы. Временная

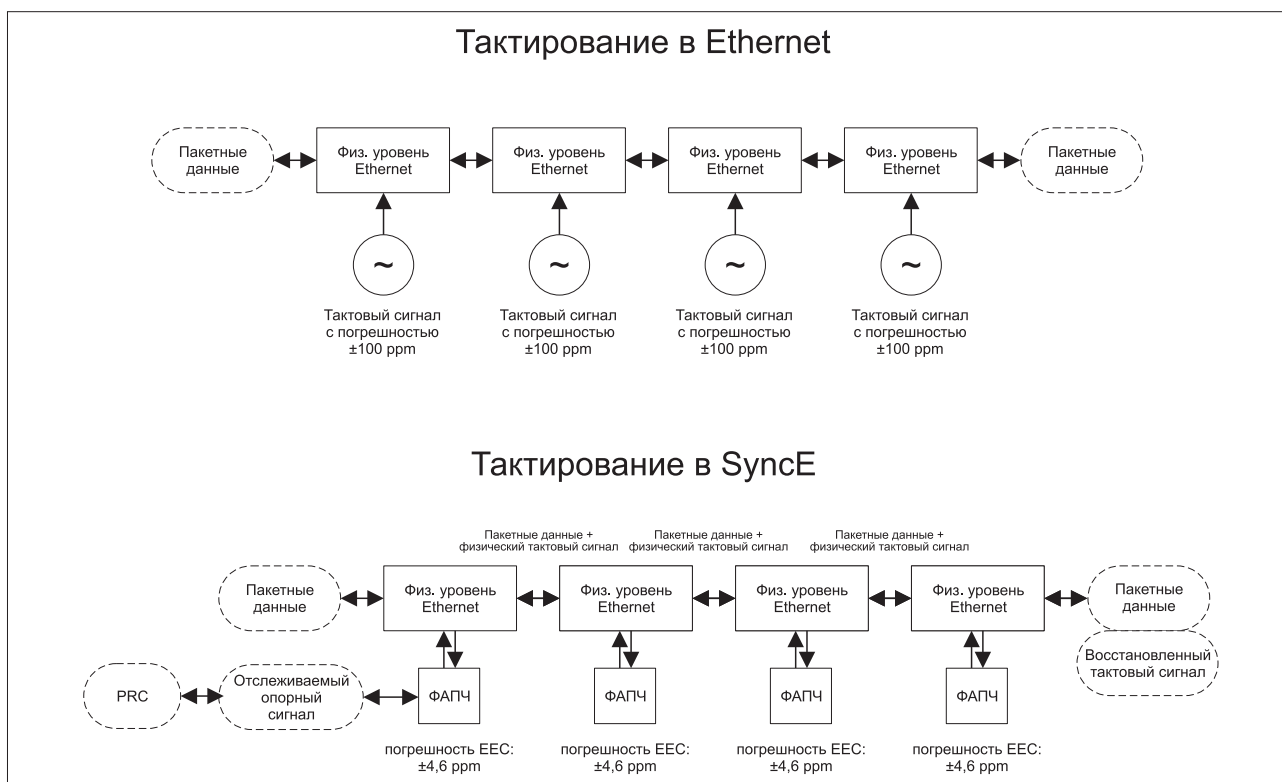


Рис. 1. Синхронизация в классическом стандарте Ethernet и SyncE

синхронизация применяется в протоколе точного времени PTP (precision time protocol).

ТРЕБОВАНИЯ К ТОЧНОСТИ SYNCЕ

Механизм синхронизации сети SyncE основан на иерархии тактовых генераторов. Сверху расположен наиболее точный генератор. Практически во всех сетях SyncE самый точный генератор представлен PRC-генератором с точностью 10^{-11} . Он обеспечивается локальным источником с очень высокой стабильностью, хотя чаще для этой цели используется сигнал GPS. Уровнем ниже находится блок источника синхронизации (SSU), где требуется функция передачи в режиме holdover, позволяющая блоку сохранять синхронизацию в течение некоторого времени в случае потери сигнала PRC. Мы вернемся к этому режиму позже.

Третий уровень занимает тактовый генератор оборудования Ethernet (Ethernet equipment clock EEC). В нем также используется режим holdover, но его точность может быть ниже, чем на уровне блока источника синхронизации. На этом уровне используется схема ФАПЧ, следящая за локальным резервным опорным источником, в качестве которого используется термостатированный кварцевый генератор (ОСХО) или кварцевый генератор с температурной компенсацией (ТСХО). Стабильность частоты – не меньше $\pm 4,6$ ppm.

Заметим, что точность всей сети в целом равна точности PRC-генератора (т. е. 10^{-11}), если доступен первичный опорный сигнал. В нормальном режиме работы он распределяется по всей сети. Иногда ошибочно считают, что SyncE имеет точность синхронизации $\pm 4,6$ ppm, однако это справедливо только для свободной идущих часов EEC. Для таких приложений как мобильные сети требуется точность около ± 50 ppb. Когда система замкнута и синхронизована с помощью PRC-генератора, ее точность равна нескольким ppb или выше. Когда устройство теряет синхронизацию, оно возвращается к точности локального опорного кварцевого генератора EEC. На рисунке 1 упрощенно показана разница между классической сетью Ethernet и SyncE (погрешность ± 100 ppm и $\pm 4,6$ ppm, соответственно).

СТАНДАРТЫ ITU ДЛЯ SYNCЕ

Международные стандарты реализации SyncE определяются группой ITU-T. Ею разработаны требования по взаимодействию между стандартами, несоблюдения которых ведет к несовместимости устройств. К сетям SyncE относятся следующие стандарты:

- G.8262 (требования к тактовым генераторам), которые определяют вре-

менные характеристики синхронных локальных тактовых генераторов EEC (Ethernet equipment clocks);

- G.8262.1 (требования к тактовым генераторам продвинутого уровня eEEC), которые определяют временные характеристики синхронных локальных тактовых генераторов продвинутого уровня. К ним предъявляются более строгие требования с акцентом на 5G.

Упомянутые стандарты содержат требования к фазовому шуму и отклонению частотных параметров тактовых генераторов SyncE. Фазовый шум определяется как отклонение фазы выше полосы 10 Гц; дрейфом фазы является ее отклонение на частотах ниже 10 Гц. Использование значения 10 Гц как разделительной линии является исторически сложившимся фактом.

Заметим, что и фазовый шум, и дрейф представляют собой изменение фазы, однако они по-разному влияют на сеть. Чрезмерный шум приводит к ошибкам в битах и к потере пакетов данных. Дрейф не позволяет тактовому генератору следить за опорным тактовым сигналом более высокого уровня. Как упоминалось, тактовые генераторы привязаны к главному опорному тактовому сигналу, а информация о тактовом сигнале передается с помощью сигнала физического уровня.

Стандарты ITU-T описывают процедуру тестирования и ожидаемые требования к тактовым генераторам SyncE. Стандарт G.8262 предлагает две разные полосы: первая (1–10 Гц) по умолчанию используется в синхронизированных сетях в Европе; она оптимизирована под требования к оборудованию в иерархии 2048 Кбит/с. Вторая полоса (0,1 Гц) используется в США; она оптимизирована под иерархию 1544 Кбит/с.

Необходимо выбрать качественный генератор синхросигнала, удовлетворяющий требованиям SyncE. Речь идет не только об обеспечении точности $\pm 4,6$ ppm – имеется еще несколько параметров. Перейдем к их рассмотрению.

Точность на холостом ходу

Точность выходного сигнала генератора, когда на него не поступает опорный сигнал более высокого уровня, должна быть не хуже $\pm 4,6$ ppm на протяжении года. Это очень высокая точность по сравнению с классической сетью Ethernet, где обеспечивается ± 100 ppm.

Режим Holdover

Тактовый генератор непрерывно рассчитывает среднюю частоту заблокированного опорного сигнала. Если опорный источник дает сбой и нет других доступных опорных тактовых сигналов,

генератор переходит в режим Holdover и вырабатывает сигнал, рассчитанный по среднему значению. Стабильность сигнала в режиме Holdover зависит от частотной стабильности резонатора ФАПЧ в главном тактовом генераторе.

Слежение за входом

Генератор синхросигнала должен постоянно следить за качеством входных сигналов. Если они искажены, т. е. наблюдаются разрывы или дрейф частоты, осуществляется бесшовное переключение на другой подходящий вход с очень малым отклонением фазы на выходе.

ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОГО ШУМА SYNCЕ

Фазовый шум имеется в каждой системе передачи данных. Некоторые компоненты, например ослабители фазового шума Silicon Labs Si539x/4x, вносят малый фазовый шум. Они надежны, устойчивы к фазовому шуму и полностью удовлетворяют следующим требованиям SyncE.

- Генерация фазового шума. Генератор не должен выходить за пределы, установленные маской. Маска определяется интерфейсом и скоростью (1G, 10G или 25G). Silicon Labs предлагает аттенуаторы фазового шума, генерирующие фазовый сигнал менее 100 фс в полосе 12 кГц...20 МГц.
- Нечувствительность к фазовому шуму. Этот тест позволяет проверить стойкость генератора к фазовому шуму на входе. На рисунке 2 показаны результаты испытаний Si5395 на стойкость к фазовому шуму 25G при подаче на вход частотно-модулированного сигнала 25 МГц. Для каждой модулирующей частоты, предусмотренной стандартом, отклонение наблюдается только до момента, когда включается сигнал сбоя. Видно, что генератор Si539x превосходит требования по стойкости к фазовому шуму.

ДРЕЙФ ЧАСТОТЫ SYNCЕ

Каждый тактовый генератор нижнего уровня привязан к частоте PRC, поскольку тактовый сигнал восстанавливается из входящего сигнала физического уровня SyncE. Однако в процессе восстановления и регенерации опорного тактового сигнала может произойти отклонение частоты. Для предотвращения этого эффекта сигнал проходит фильтрацию в ФАПЧ. Полоса пропускания ФАПЧ не превышает 10 Гц. В стандартах всегда указывается дрейф, который может быть пропущен ФАПЧ, и отклонение, вносимое самой ФАПЧ в отсутствие дрейфа сигнала на входе.

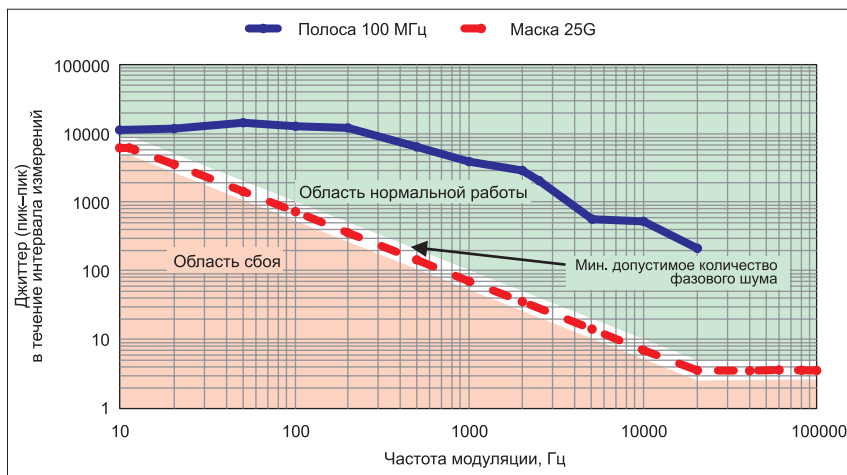


Рис. 2. Результаты измерения стойкости к фазовому шуму тактового генератора SyncE Si5395. Устройство соответствует требованиям G.8262

Отклонение частоты измеряется по отношению к внешнему опорному тактовому генератору, который напрямую соединен с главным тактовым генератором. Основной единицей измерения является ошибка временного интервала TIE, на основе которой вычисляются следующие параметры.

- Максимальная ошибка временного интервала MTIE (maximum time interval error). Она представляет собой размах TIE. Максимальная ошибка временного интервала равномерно возрастает с увеличением

времени наблюдения. Это долгосрочный показатель стабильности, нечувствительный к ВЧ-шуму.

- Временной дрейф TDEV (time deviation), по сути, представляет собой спектральный анализ зависимости TIE от интервала наблюдения t . Он рассчитывается путем вычисления среднего значения TIE после фильтрации полосы пропускания. Это значение обратно пропорционально интервалу наблюдения. Для получения точного значения TDEV измерения

проводятся в течение времени, по крайней мере, в 12 раз превышающего максимальный требуемый интервал наблюдения.

В большинстве контрольных процедур в SyncE требуется измерение дрейфа и отклонений. При этом результаты измерений в большой мере зависят от качества сигнала резервного опорного тактового кварцевого генератора (ТСХО/ОСХО). Рассмотрим эти процедуры подробнее.

Вносимый дрейф

Внутренний дрейф тактового генератора можно измерить, когда на входе сигнал без дрейфа. С помощью масок MTIE и TDEV установлены строгие пределы на величину дрейфа, который может вносить генератор в SyncE. На рисунке 3 показаны маски MTIE и TDEV, а также результаты измерения для аттенюатора фазового шума Silicon Labs Si5395.

Допустимый дрейф

На вход генератора подается сигнал с дрейфом для проверки работоспособности генератора при неблагоприятных условиях. Задачей проверки является нахождение максимального значения дрейфа, при котором устройство не регистрирует сбоя. Маски MTIE

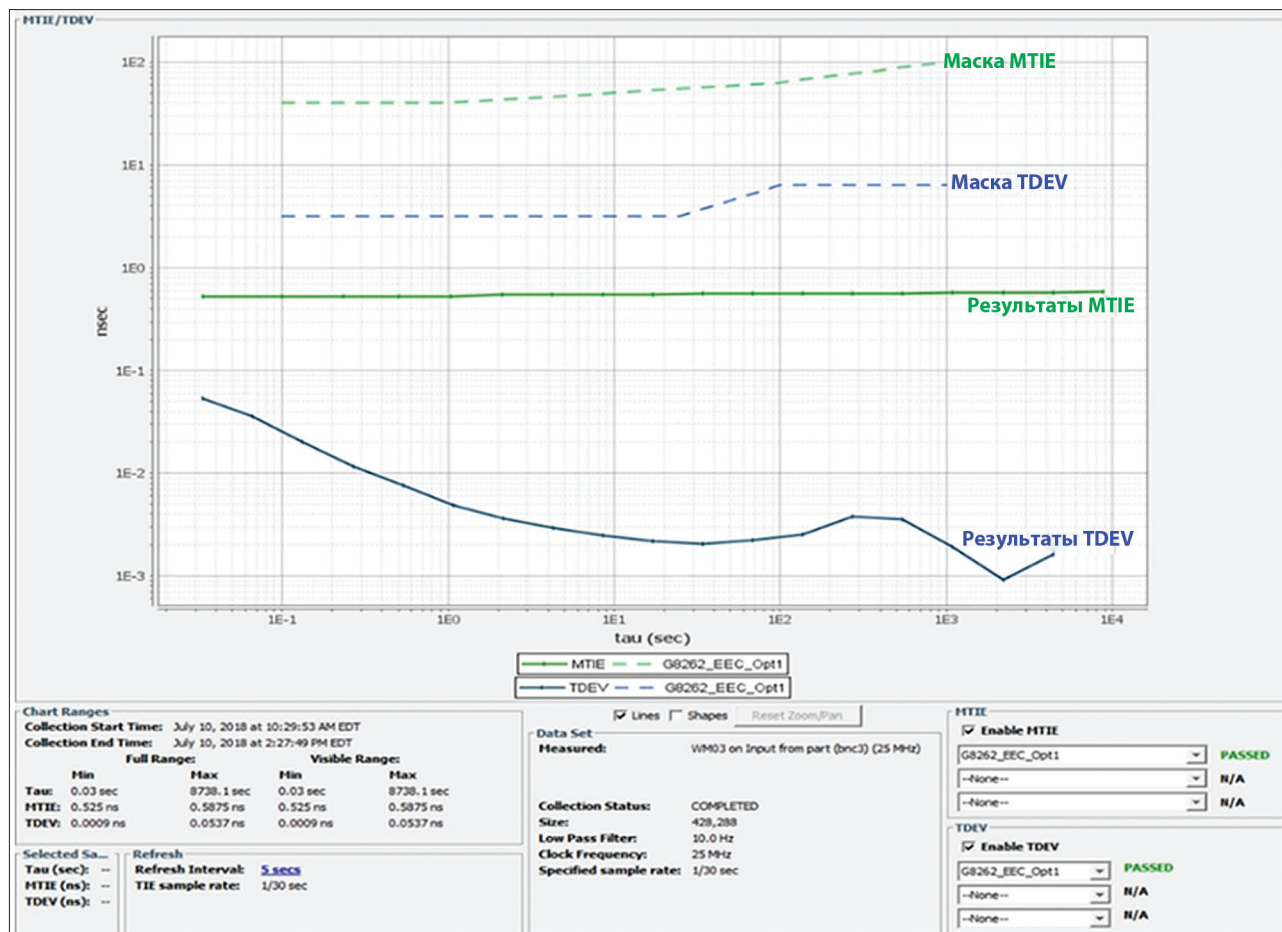


Рис. 3. Маски MTIE, TDEV (пунктиром) и результаты измерений аттенюатора фазового шума Si5395 от Silicon Labs

и TDEV позволяют установить пределы отклонений на выходе при известном отклонении на входе.

Передача дрейфа

Этот параметр характеризует количество дрейфа, которое проходит через генератор на выход и не отфильтровывается ФАПЧ.

Перескок фазы

Перескоки фазы возникают, когда входной опорный сигнал теряется и ФАПЧ переключается на другой опорный источник или в режим holdover, если резервный генератор недоступен. Стандартом установлены ограничения на перескоки.

Выводы

На начальной стадии проектирования следует определить требования, предъявляемые к системе, чтобы выбрать метод синхронизации. Стандарт SyncE имеет преимущества по сравнению с Ethernet, поскольку обеспечивает централизованную синхронизацию узлов.

Синхросигнал передается на физическом уровне, обеспечивая высокую точность (порядка ppb) во всей сети. Его можно использовать для создания проводных и гибридных сетей с синхронизацией частот, которая необходима для приложений реального времени.

Заметим, что сеть SyncE обеспечивает только синхронизацию частот, но не может передавать информацию о времени суток.

Временная, частотная и фазовая синхронизация в сети Ethernet выполняется с помощью PTP – двустороннего протокола передачи сообщений для синхронизации времени суток между главным генератором и подчиненными. ➡