УДК 62-533.7

Є.В. ЛЕБІДЬ, ад'юнкт (Військ. ін-т телекомунікацій та інформатизації, м. Київ)

ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ ДЛЯ СИНХРОНІЗАЦІЇ СИГНАЛІВ У СУЧАСНИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖАХ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

Наведено принципи синхронізації, що повинні забезпечити роботу цифрових систем мережі в єдиних часових інтервалах. Указано, що збої в синхронізації завжди призводили до зниження якості послуг, які надавалися. Розглянуто метод організації передачі синхронізації в пакетних мережах Ethernet. Ця тема актуальна, оскільки на основі транспортної пакетної мережі з'являється все більше сервісів, критичних до суворих вимог із синхронізації.

Приведены принципы синхронизации, которые должны обеспечить работу цифровых систем сети в единых временных интервалах. Указано, что сбои в синхронизации всегда приводили к снижению качества предоставляемых услуг. Рассматривается метод организации передачи синхронизации в пакетных сетях Ethernet. Эта тема актуальна, поскольку на основе транспортной пакетной сети появляется все больше сервисов, критичных к суровым требованиям по синхронизации.

Principles of synchronization must provide work of the digital systems of network in only sentinel intervals. Failures in synchronization always resulted in the decline of quality of services which was given. In the article the method of organization of transmission of synchronization is examined in the package networks of Ethernet. This theme is actual, as all more services, critical to the severe requirements on synchronization, appear on the basis of a transport package network.

Всі системи цифрового зв'язку вимагають синхронізації сигналів, яка полягає у встановленні й підтримці точної часової відповідності сформованих у передавальній частині й прийнятих у приймальній частині сигналів. У статті розглянуто основи синхронізації різних рівнів у цифровому зв'язку. Синхронізація в багатоканальному цифровому зв'язку пов'язана зі завданнями демодуляції, декодування повідомлень, а також з комутацією й розподілом інформації споживачам. Для функціонування цифрової мережі зв'язку необхідно забезпечити доставку синхроінформації еталонного джерела синхронізації до всіх пристроїв мережі. При цьому інформацію щодо синхропараметрів сигналу отримують за допомогою пристрою синхронізації з коливань, які прийнято, або ж вона надходить за окремим каналом.

Вимоги до синхронізації в сучасних мережах. Основна проблема в транспортних мережах нового покоління те, що технологія Ethernet спочатку проектувалася для локальних обчислювальних мереж, і ніколи не була призначена для передачі сигналів синхронізації. У мережах з комутацією каналів у останні десятиліття як в транспортне середовище домінує технологія синхронної цифрової ієрархії (SDH), в її основу покладено передачу синхросигналів. Але навіть ця надійна технологія, що добре себе зарекомендувала, не відповідає вимогам сучасних застосувань.

Слід зазначити, що передача синхросигналу будь-якого типу здійснюється з точністю, яка повинна задовольняти вимоги технологій нових сервісів або нормативних документів. Таким чином, вимоги до синхронізації визначаються додатками й сервісами, що надаються операторами зв'язку, але транспортна мережа повинна мати можливість задовольнити всі потреби й відповідати навіть дуже суворим нормам. У табл. 1 подано мережні елементи, які використовуються для різних застосувань і, відповідно, вимоги до синхронізації.

© Є.В. ЛЕБІДЬ, 2015

Таблиця 1. Норми синхронізації для сучасних мережевих технологій

Мережевий елемент	Норма до частотної синхронізації	Норма до фазової синхронізації
cdma2000 BS	5*e-8	3 мкс
GSM	5*e-8	-
UMTS-TDD BS	5*e-8	1,25 мкс
UMTS-FDD BS	5*e-8	-
WiMax BS	5*e-8	1 мкс*
LTE BS	5*e-8**	1 мкс**
APON/GPON OLT	1*e-11	-
SDH/SONET, ATM	1*e-11	-

* Для технології WiMax з часовим розподілом каналів (TDD) базових станцій – обов'язкова вимога, а з частотним розподілом (FDD) – опція.
** Сервіси, що надаються в мережі LTE, вимагають жорстких норм з частотної й фазової синхронізації.

Синхронізовані Ethernet мережі. Технологія Ethernet розроблялася виключно з метою використання в локальних мережах. Методи лінійного кодування інформації на фізичному рівні обиралися відповідно до завдань, які не передбачали передавати синхросигнал. У мережах SDH спочатку використовувалися лінійні коди NRZ, які пристосовані для передачі синхронізації на фізичному рівні каналу зв'язку. При створенні технології Sync Ethernet фізичний рівень і методи кодування були запозичені з технології SDH, а другого рівня зміни практично не торкнулися. Структура кадрів залишилася незмінною, за винятком SSM-байта статусу синхронізації. Його значення також були запозичені з технології SDH.

З рис. 1 видно, що синхронізація здійснюється в Ethernet на кожному мережному сегменті між двома сусідніми вузлами, але вона не поширюється від сегмента до сегмента. Таким чином, вузол приймає тактовий сигнал, відновлює його, а потім пересилає усім передавальним вузлам (рис. 2).

Відновлений сигнал потребує очищення за допомогою системи фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ), що дозволяє усунути джиттер з ланцюга відновлення тактового сигналу до того, як він надійде на передавальний пристрій. Крім того, необхідно вручну налаштувати порти в тракті передачі сигналу синхронізації (тільки для мережі 1000 Base-T).

Будь-який пристрій фізичного рівня мереж Gigabit Ethernet або 10 Gigabit Ethernet повинен підтримувати синхронізовану Ethernet мережу, забезпечуючи відновлений синхросигнал на одному зі своїх виходів. Відновлений синхросигнал очищується за допомогою системи ФАПЧ і передається на вхід 25-МГц кварцового генератора фізичного пристрою. Декілька нових фізичних пристроїв Ethernet мережі забезпечують спеціальний вивід для вхідного тактового сигналу. Перевагою цього методу є те, що частота вхідного сигналу може бути вище 25 МГц (чим вище частота синхронізації, тим менше джиттер). Крім того, цей метод

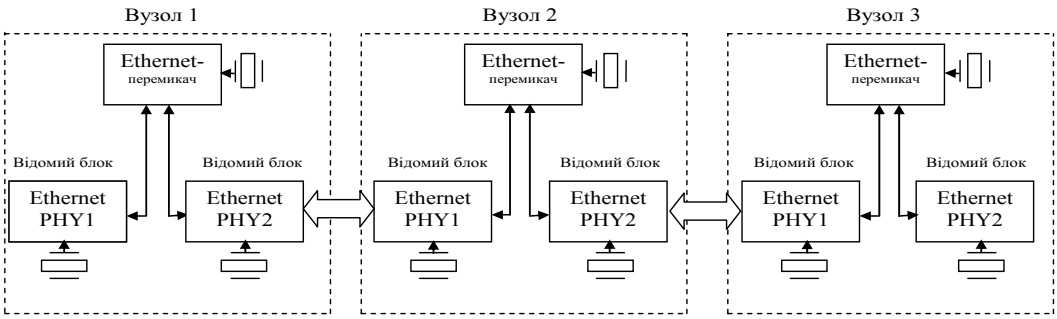

Рис. 1. Синхронізація на фізичному рівні в традиційній Ethernet-мережі

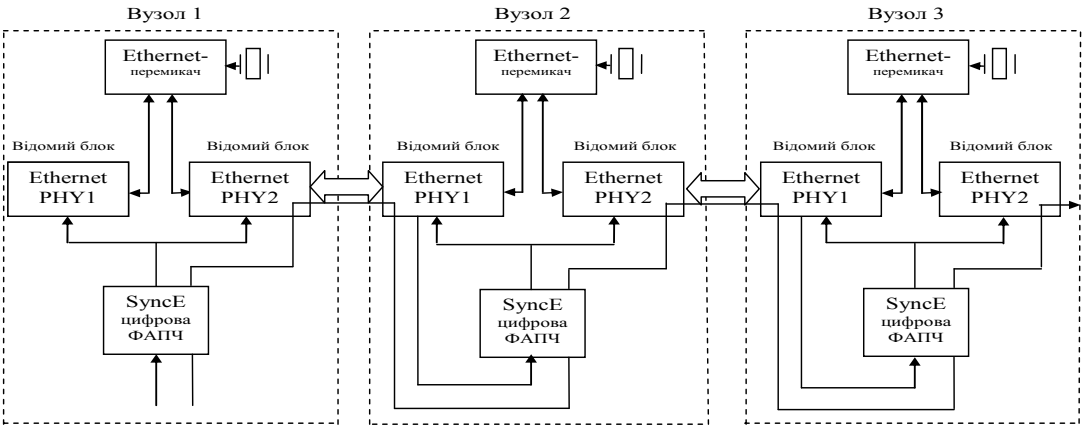

Рис. 2. Синхронізація на фізичному рівні в Ethernet

дозволяє уникнути будь-яких потенційних проблем, що пов'язані з циклом синхронізації фізичного пристрою.

Вимоги до системи ФАПЧ, яка використовується в технології SyncE. Із вищесказаного можна зробити висновок, що єдина функція системи ФАПЧ, яка використовується в технології SyncE, полягає в очищенні відновленого сигналу від джиттера. Але в SyncE схема ФАПЧ повинна забезпечувати й інші функції.

Наприклад, якщо приймальний пристрій фізичного рівня (рис. 3, вузол 2, PHY 1) від'єднаний від лінії, відновлена частота синхронізації припинить або почне дрейфувати, залежно від того, як реалізована схема відновлення синхронізації після збою. Схема ФАПЧ загального призначення не відстежить цієї великої зміни в частоті на передавальному фізичному пристрої (рис. 3, вузол 2, фізичний рівень 2), і в результаті не лише тактовий сигнал не буде передано, але не відбудеться й передача даних.

Схема ФАПЧ в технології SyncE повинна виявляти збій відновленого сигналу синхронізації і вміти перемикатися або на корисний опорний сигнал системи, або перемикати генератор у режим утримання. Вимоги до SyncE коротко викладено в специфікації внутрішнього годинника синхронної Ethernet мережі (ITU G.8262/Y1362). Ці вимоги засновані на специфікації ITU-T G.813 для тактових сигналів стандарту SDH.

Точність в автономному режимі: точність вихідного сигналу схеми ФАПЧ, коли вона не керується опорним сигналом, має дорівнювати або бути вище ±4,6 ppm впродовж одного року. Це дуже висока точність відносно точності традиційної Ethernet мережі (±100 ppm).

Режим утримання: система ФАПЧ постійно розраховує середнє значення частоти синхронізованого опорного сигналу. У випадку, якщо опорний сигнал не надходить, а також відсутні інші опорні сигнали, ФАПЧ переходить у режим утримання й генерує вихідний синхросигнал на основі розрахункового середнього значення. Стійкість режиму залежить від дозволу усереднювального алгоритму й стабільності частоти генератора, що використовується як задавальний тактовий генератор ФАПЧ.

Контроль за опорним сигналом: система ФАПЧ повинна постійно контролювати якість вхідних опорних сигналів. Якщо сигнал погіршується (сигнал зникає або дрейфує частота), блок ФАПЧ подає сигнал тривоги (переривання) й перемикається на інший опорний сигнал.

Перемикання опорного сигналу без паузи: якщо ФАПЧ система не виявляє опорного сигналу, вона захоплює інший опорний сигнал. При цьому фаза сигналу не змінюється.

Фільтрація джиттера й стабілізація дрейфу: блок ФАПЧ можна розглядати як фільтр для джиттера й засіб стабілізації дрейфу.

Стійкість до джиттера й дрейфу: система ФАПЧ має бути стійкою до великого джиттера й дрейфу на вході та підтримувати синхронізацію, не генеруючи сигналу тривоги.

Ці жорсткі вимоги можна задовольнити тільки за допомогою цифрової системи ФАПЧ (DPLL), схожої з тією, яка використовується для синхронізації мережі SONET/SDH. Основна відмінність полягає в тому, що система SyncE DPLL повинна захоплювати й генерувати тактові частоти, що використовуються

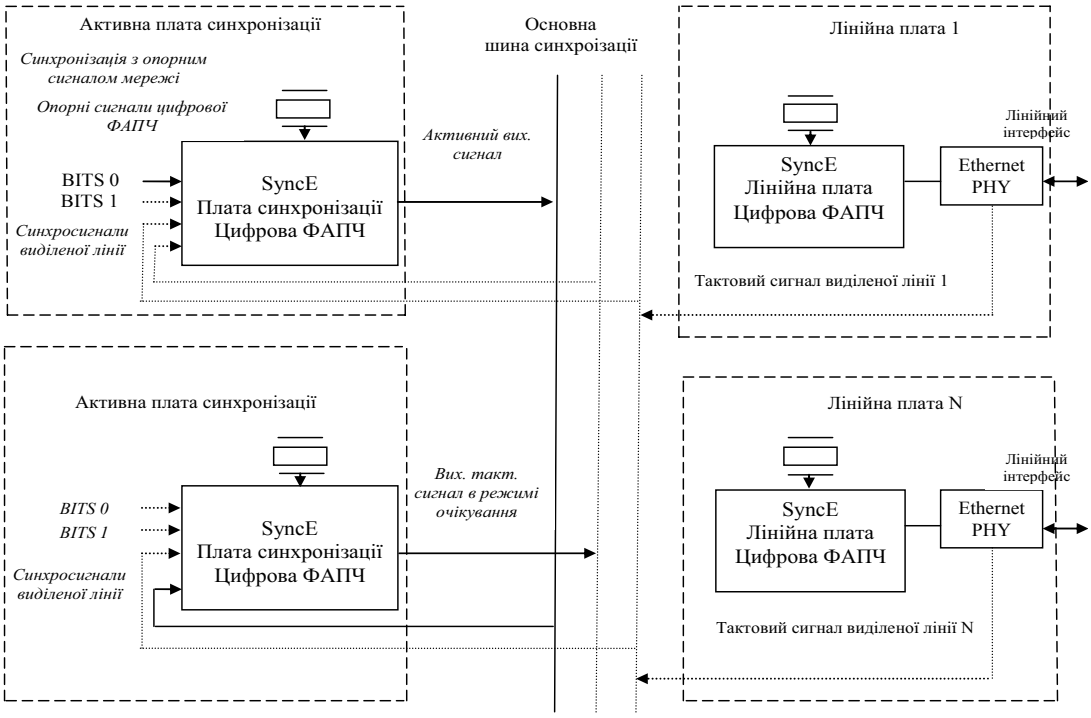

Рис. 3. Резервна синхронізація в SyncE системі операторського класу

в Ethernet (25, 125 і 156,25 МГц), тоді як в SONET/SDH задіяні інші значення тактових частот (19,44 і 155,52 МГц).

Реалізація систем SyncE. SyncE системи операторського класу повинні забезпечувати надійне функціонування. Синхронізація в системі операторського класу реалізується за допомогою двох плат, з яких тактові сигнали надходять на декілька лінійних плат через загальну плату (рис. 3). Усі лінійні плати синхронізуються з тактовим сигналом, що надходить з активної плати. Якщо вона не підключена, лінійні плати стануть синхронізуватися із сигналом, що надходить з резервної плати. Перемикання з однієї плати синхронізації на іншу не повинно викликати переривання або збою в системі.

Дві плати синхронізації забезпечують захист системи на випадок відмови однієї з них. З рис. 3 видно, що плати мають можливість синхронізації від більш ніж одного опорного сигналу. Плата приймає опорні сигнали з декількох джерел, вибирає один з них, очищує від фазового шуму за допомогою цифрової ФАПЧ і передає лінійним платам через загальну панель. Цифрова схема ФАПЧ є найбільш важливою складовою плати синхронізації. Опорні сигнали цифрової ФАПЧ надходять ззовні з блока SSU/BITS, зсередини з лінійних плат або від іншої плати синхронізації в системі. Цифрова ФАПЧ плати синхронізації повинна відповідати всім вимогам рекомендації ITU-TG.8262/Y1362.

Кожну лінійну плату оснащено схемою цифрової ФАПЧ, яка дозволяє зменшити джиттер і перетворити частоту тактового сигналу в один або більше тактових сигналів для Ethernet PHY з частотою 125, 156,25, 155,52 МГц і так далі.

Цифрова ФАПЧ лінійної плати повинна також забезпечити перемикання без паузи між активним і резервним тактовим сигналом (коли активний синхросигнал несподівано зникає, а система ще не виявила збій і не перемкнула цифрову схему ФАПЧ лінійної плати на резервний опорний сигнал).

Для цифрової ФАПЧ лінійної плати потрібен кварцовий генератор. Вартість цього генератора невисока, оскільки для цифрової ФАПЧ лінійної плати не потрібний режим утримання (окрім коротких інтервалів часу перемикання з активного на резервний тактовий сигнал). У випадку, якщо цей режим займає тривалий час, система використовує цифрову ФАПЧ плати синхронізації і тому їй потрібні кварцові генератори вищої якості (TCXO, OCXO)

Малі SyncE системи, яким не потрібна резервна синхронізація, мають тільки одну цифрову схему ФАПЧ. Вона повинна задовольняти всі вимоги як цифрової системи ФАПЧ плати синхронізації, так

і цифрової ФАПЧ лінійної плати. У цієї ФАПЧ має бути вузька ширина смуги петлі, функція утримання високої якості (потрібно ТСХО або ОСХО), можливість перемикання опорного сигналу без паузи й дуже малий власний джиттер. Залежно від того або іншого застосування може також знадобитися, щоб ця цифрова ФАПЧ генерувала частоти 8 кГц; 2,048; 1, 544; 34,368; 44,736 МГц і так далі.

Висновки

До переваг технології Sync Ethernet можна віднести використання SDH структури фізичного рівня, досвід проектування і побудови мереж тактової мережної синхронізації. Ідентичність методів зберігла актуальність старих рекомендацій G.803, G.804, G.811, G.812 і G.813 у новій технології. Дорогі пристрої: первинні еталонні генератори, вторинні задавальні генератори (ВЗГ) – можуть бути задіяні також і в новій транспортній мережі, побудованій на стандарті Sync Ethernet.

До недоліків можна віднести те, що в усій мережі передачі кожен пристрій повинен підтримувати новий стандарт, й якщо в лінії залишається пристрій, який не підтримує Sync Ethernet, то всі пристрої, які стоять за цим вузлом, не можуть працювати в синхронному режимі. Отже, потрібні великі матеріальні витрати на модернізацію усієї мережі.

Ці жорсткі вимоги можна задовольнити тільки за допомогою цифрової системи фазового автопідстроювання частоти, отже потрібно проводити аналіз цих схем, вдосконалювати математичні основи для моделювання та аналізу робочих характеристик таких систем .

Таким чином, розробка методів проектування повністю цифрових систем фазового автопідстроювання частоти для поліпшення їхніх технічних характеристик є актуальним завданням.

Список літератури

1. *Milijevic S.* An introduction to Synchronized // w.w.w.videsingnline.com.
2. *J-L Ferrant*. Synchronous Ethernet: A method to transport synchronization / Jean-Loop Ferrant, Alcatel-Lucent, Mike Gilson, British Telecom, Sebastien Jobert, France Telecom, Michael Mayer and Michel Ouellette, Nortel, Laurent Montini, Cisco, Silvana Rodrigues, Zarlink, Stefano Ruffini, Ericsson // IEEE Communication Magazine. – September 2008. – P. 126-134.