

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

Кафедра мобільних та відеоінформаційних технологій

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему:

**«РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО СИНХРОНІЗАЦІЇ
МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 5G»**

Виконав: студент 6 курсу, групи РТДМ-61
спеціальності

172 Телекомунікації і радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Бочко М.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник

Руденко Н.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Серих С.О.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Макаренко А.О.

(прізвище та ініціали)

Київ - 2021

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Кафедра	Мобільних та відеоінформаційних технологій
Ступінь вищої освіти	Магістр
Спеціальність	172 Телекомунікації і радіотехніка (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

мобільних та відеоінформаційних технологій

Руденко Н.В.

2021 року

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТАРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Бочко Марк Андрійович

1. Тема роботи: «Розробка технічних рекомендацій щодо синхронізації мережі мобільного зв'язку 5G», керівник роботи Руденко Наталія Вікторівна, к.т.н., затверджені наказом вищого навчального закладу від 11.10.2021 року № 170 .
2. Строк подання студентом роботи 20.12.2021 р.
3. Вихідні дані до роботи:
 1. Науково-технічна література;
 2. Наукові статті;
 3. Технічні конференції.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
 1. Основи синхронізації;
 2. Використання синхронізації та таймінгу;
 3. Концепції синхронізації та таймінгу в 5G.

5. Графічна частина роботи представлена на 11 слайдах презентації

6. Дата видачі завдання 11.10.2021р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір науково-технічної літератури	19.10.2021	Виконано
2	Основи синхронізації	25.10.2021	Виконано
3	Використання синхронізації та таймінгу	08.11.2021	Виконано
4	Концепції синхронізації та таймінгу в 5G	20.11.2021	Виконано
5	Рекомендації до синхронізації	25.11.2021	Виконано
6	Висновки, вступ, реферат	10.12.2021	Виконано
7	Розробка презентації	18.12.2021	Виконано

Студент

Бочко М.А.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Руденко Н.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської кваліфікаційної роботи: 79 сторінки, 21 рисунок, 30 джерел.

Об'єкт дослідження – технології синхронізації мобільного зв'язку.

Предмет дослідження – особливості нових технологій та їх застосування у найближчі роки.

Мета роботи – визначити та проаналізувати які рішення будуть найкращими для синхронізації мереж 5-го покоління, а також визначити існуючі проблеми зв'язані з їх впровадженням.

Методи дослідження – стандарти та протоколи синхронізації.

У роботі представленні основні рекомендації для рішення синхронізації мереж. Розробленні моделі для імплементації нових технологій у діючу мережу, а також виявленні та проаналізовані різні шляхи та тенденції. У роботі розглянуто актуальність та спроможність технологій до використання.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ ОСНОВ СИНХРОНІЗАЦІЇ У МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ.....	11
1.1 Частота в порівнянні з фазою в порівнянні з синхронізацією за часом	11
1.2 Частотна синхронізація	13
1.3 Синхронізація часу доби	15
1.4 Міжнародний атомний час (TAI).....	16
1.5 Забезпечення хронометражу та синхронізації за допомогою GPS.....	17
2 ВИКОРИСТАННЯ СИНХРОНІЗАЦІЇ ТА ТАЙМІНГУ	21
2.1 Використання синхронізації у телекомунікаціях	21
2.2 Застарілі мережі синхронізації	21
2.3 Емуляція схеми	27
3 КОНЦЕПЦІЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ ТА ТАЙМІНГУ В 5G	31
3.1 Синхронні мережі	34
3.2 Визначення частоти	35
3.3 Визначення фазової синхронізації	38
3.4 Синхронізація із пакетами	42
3.5 Джиттер і блукання	44
3.6 Рівні частотних тактових імпульсів за стандартом ANSI	47
3.7 Годинник частоти, фази та часу	50
3.8 Пакетний годинник	52
3.9 Транспорт часу та синхронізації	54
4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО СИНХРОНІЗАЦІЇ МЕРЕЖ 5-ГО ПОКОЛІННЯ.....	55
4.1 Рекомендації ІТУ-Т за фізичним часом та часом	57
4.2 Типи стандартів для фізичної синхронізації	57
4.3 Функції рівня синхронізації для пакетних мереж	67
4.4 Можливі зміни у рекомендаціях у майбутньому	79
ВИСНОВКИ.....	81
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	82
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ.....	84

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

4G LTE Стандарт 4-го покоління мобільного радіозв'язку
5G NR Стандарт 5-го покоління мобільного радіозв'язку
3GPP Проект партнерства третього покоління
GPS Система глобального позиціонування
TAI Міжнародний атомний час
GNSS Глобальна навігаційна супутникова система
UTC Всесвітній координований час
TDM Мультиплексування з поділом за годиною
SDH Синхронна цифрова ієрархія
PDH Плезіохронна цифрова ієрархія
PON Пасивні оптичні мережі
SSU Блок джерела синхронізації
PRS Первинне еталонне джерело
PRC Первинний еталонний годинник
ETSI Європейський інститут телекомунікаційних стандартів
GSM Глобальна система мобільного зв'язку
UMTS Універсальна система мобільного зв'язку
FDD Частотний поділ каналів
PTP Протокол точного часу
PMA Підрівень підключення до фізичного середовища
PDV Зміна затримки пакета
ANSI Американський національний інститут стандартів
PRTC Джерело частоти, фази та часу
QL Рівні якості
SSM Повідомлення про стан синхронізації
TIE помилку тимчасового інтервалу

ВСТУП

Синхронізація часу - це просто механізм, що дозволяє координувати та узгоджувати між собою:

- Процеси, такі як роботи на заводі, що працюють над одним віджетом;
- Годинник, що працює незалежно один від одного, наприклад, годинник по залізничній мережі (включаючи перехід на літній або літній час);
- Комп'ютери, які повинні обробляти інформацію у правильному часовому порядку, наприклад, здійснювати угоди в системі торгівлі акціями;
- Численні потоки інформації, які мають бути представлені в строгій послідовності або скоординовані один з одним - хорошим прикладом є аудіо та відео в телевізійному сигналі;
- Події спостерігаються у кількох місцях. Спостерігачі можуть визначити місце події (наприклад, відстежуючи шторми по ударах блискавок), якщо кілька детекторів блискавок можуть записувати час виявлення з точно вирівняним годинником;
- Датчики, які відстежують реальні процеси. Якщо для події реєструється точна тимчасова позначка, оператори можуть визначити правильну послідовність у ланцюжку подій, що ведуть до критичної ситуації (наприклад, моніторинг стабільності енергосистеми).

Точний час є важливим атрибутом сучасної мобільної мережі. Ці мережі вимагають добре спроектованої та реалізованої системи синхронізації, щоб максимізувати їх ефективність, надійність та пропускну спроможність. Неправильне розуміння цього означає, що мобільні абоненти, швидше за все, страждатимуть від переривання викликів, переривання використання даних та загалом поганої взаємодії з користувачем. У той же час оператори страждатимуть від нестабільності мережі, неефективного використання радіочастотного спектру та незадоволених клієнтів. Зверніться до розділу 10 «Вимоги до мобільного часу» для отримання додаткової інформації про мобільні стандарти та вимоги.

Сучасні мережі 5G створюються з використанням дуже складних радіотехнологій, призначених для збільшення швидкості передачі даних та надійності, підвищення якості обслуговування абонентів та максимального використання спектру (який зазвичай купується за дуже високою ціною). Методи, що використовуються в радіоприймачах, засновані на координації між передавальним та приймальним обладнанням, розташованим досить далеко один від одного. Це включає великі макроосередки з великою площею; локалізовані дрібні клітини; та мобільне власне обладнання (наприклад, ваш телефон), які всі повинні працювати разом. Ця ефективна координація ґрунтується на тісній синхронізації між цими різними компонентами радіосистеми 5G.

Успішне розгортання синхронізації використовує комбінацію методів для синхронізації джерела та перенесення. Таким чином, секретом успішного рішення для синхронізації є вибір технологій з гнучкістю для підтримки безлічі мережевих топологій та конструкцій. Як правило, це об'єднує мережу стратегічно розташованих джерел часу - найбільш ймовірних приймачів супутникової навігаційної системи, такий як Глобальна система позиціонування (GPS), - і добре спроектовану транспортну мережу для виконання відліку часу туди, де це необхідно.

Об'єкт дослідження – технології синхронізації мобільного зв'язку.

Предмет дослідження – особливості нових технології та їх застосування у найближчі роки.

Мета роботи – визначити та проаналізувати які рішення будуть найкращими для синхронізації мереж 5-го покоління, а також визначити існуючі проблеми зв'язані з їх впровадженням.

Методи дослідження – стандарти та протоколи синхронізації, наукові статті.

1 АНАЛІЗ ОСНОВ СИНХРОНІЗАЦІЇ У МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

1.1 Частота в порівнянні з фазою в порівнянні з синхронізацією за часом

Багато людей вільно використовують терміни тактування, синхронізація та відлік часу як синоніми, але настав час уточнити різні форми синхронізації. На рис. 1.1 показаний спосіб продемонструвати різницю, використовуючи музику як аналогію.

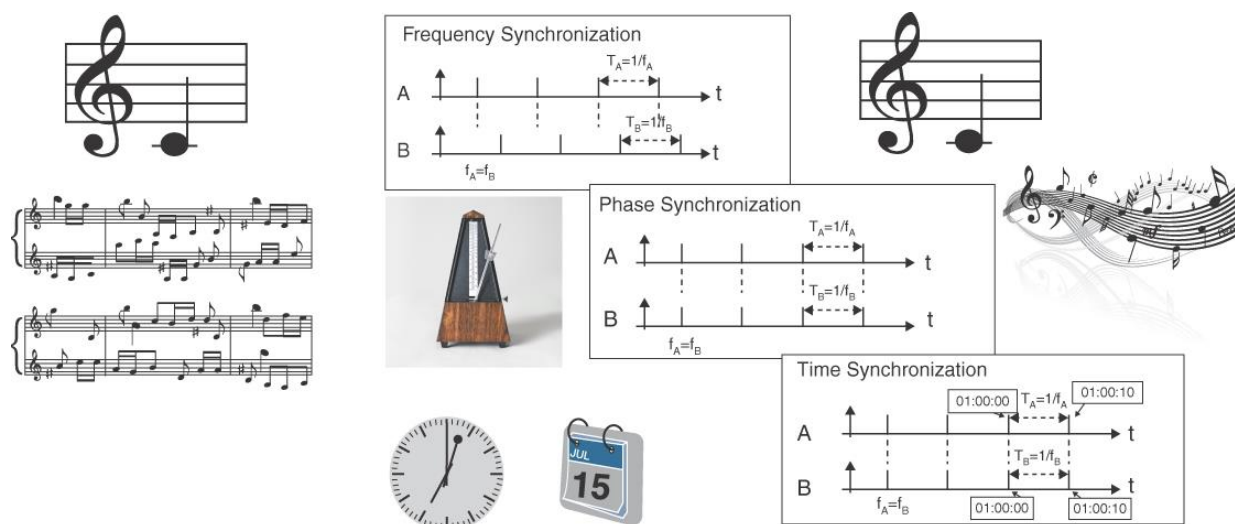


Рис. 1.1. Синхронізація у музики

Відповідно до цієї аналогії, частотна синхронізація - це процес забезпечення того, щоб два вібруючі джерела звуку в інструменті відтворювали ту саму ноту. Прикладом може бути випадок, коли музикант грає на інструменті ноту A над середньою до (звукові хвилі, що несуть A над середньою до або A4, коливаються з частотою 440,00 Гц). Відтворення тієї ж ноти іншому інструменті, такому як фортепіано, має генерувати звукову хвилю тієї ж частоти [1].

З іншого боку, фазова синхронізація пов'язана із забезпеченням того, щоб два або більше окремих процесів виконували заплановану дію лише тоді, коли вона мала статися. Інший спосіб подумати про це – це коли секундна стрілка годинника фактично «тикає». Два тактові генератори можуть працювати з однаковою

швидкістю (частота синхронізована), але якщо вони не відраховують секунди одночасно, їхня фаза не вирівняна. Процеси, які синхронізовані по фазі (або вирівняні по фазі), розуміють час таким чином, щоб гарантувати дотримання правильної послідовності, і одночасні події відбуваються в той самий момент.

У музичній частині цієї аналогії метроном або диригент оркестру нестиме відповідальність за те, щоб музиканти грали у правильному ритмі чи темпі і щоб один і той же музичний уривок одночасно відтворювався кожним музикантом – хор повинен «співати». той самий лист». Якщо музиканти не зіграють ноти у потрібний час або у потрібному темпі, музика відразу ж стане різкою та немелодійною.

Коли два процеси синхронізовані по фазі, термін фазова точність описує, наскільки далеко ці два процеси знаходяться один від одного в їхньому розумінні того, коли має відбутися подія. Точність фази зазвичай виявляється у частках секунди, тому ви можете сказати, наприклад, що два тактові генератори вирівняні по фазі в межах 100 мілісекунд (100 мс), коли один на 100 мс швидше за інший.

Зверніть увагу, що частотна синхронізація, ні фазова синхронізація не пов'язані з фактичним часом дня. Останній термін, синхронізація часу, означає надання дати та часу, з якими люди можуть погодитись. Точніше, це фазова синхронізація у поєднанні з підрахунком часу, що минув із певної початкової точки (званої епохою). Якщо всі згодні з початковою точкою часу (епохою) та швидкістю, з якою проходить час (частотою), то всі синхронізуються за датою та часом.

Тут наша музична аналогія дещо порушується. Припустимо, початок концерту заплановано на 19.00. (19:00) 15 липня, тому будь-хто, хто хоче бути присутнім в аудиторії, щоб послухати подію, має бути присутнім до цього часу. Але для цього необхідно погодити поточну дату та час, щоб усі розуміли, коли цей концерт розпочнеться. Отже, тимчасова синхронізація корисна передачі абсолютного моменту часу шляхом присвоєння йому значення; або шляхом запису події та можливості розмістити його послідовно з іншими подіями (побудова тимчасової шкали).

Отже, вечірні новини розпочинаються щодня о 22:00. (22:00:00) за місцевим часом, а Брексіт стався 31 січня 2020 р., 23:00:00 за Грінвічем. Звичайно, щоб ця

схема працювала, весь наш годинник повинен бути синхронізований за погодженим часом. Ви, ймовірно, добре знайомі з синхронізацією часу з досвіду роботи зі звичайними мобільними телефонами, комп'ютерами та розумним годинником, оскільки вони автоматично синхронізуються за часом з мережі, на відміну від старих наручних годинників.

1.2 Частотна синхронізація

Як було сказано раніше, частотна синхронізація - це просто здатність змусити дві речі вібрувати або коливатися з однією частотою або швидкістю. Це те, що робить налаштовувач піаніно, і чому всі музиканти в оркестрі настроюють свої інструменти перед концертом – вони «синхронізують частоту» своїх інструментів. Інструменти, які правильно синхронізовані за частотою, називаються «настроєними», тоді як експерт за часом сказав би, що вони «синхронізовані за частотою» або синтезовані (правильний технічний термін).

Якщо ви синхронізуєте частоту таких машин, як комп'ютери, радіо або навіть годинник, ви здебільшого робите те саме, що й тюнер піаніно. Кожен пристрій, наприклад кварцовий наручний годинник, домашній комп'ютер або мобільний телефон, містить осцилятор (можливо, більше одного). Інженер по кремнію конструює цей генератор так, щоб він працював на дуже точній частоті, відомій як номінальна частота. Ця номінальна частота буде розроблена для цільового додатку з урахуванням інших вимог, таких як енергоспоживання, тому номінальна частота може змінюватись - наприклад, 20,00 МГц у мережному маршрутизаторі або 32768 Гц у кварцовому годиннику.

Перше, що потрібно зрозуміти, це те, що в гру вступає фізика, і тому пристрій ніколи, природно, не вагатиметься з точно правильною номінальною частотою. За замовчуванням він буде або швидким, або повільним, навіть на мінімальну кількість. Очікувана величина відхилення осцилятора є частиною технічних характеристик осцилятора (точність частоти) і може бути виражена в частинах

мільйон (ppm) або частинах мільярд (ppb). Чим краще генератор, тим нижче це число - типове значення для генератора 20 МГц у маршрутизаторі Cisco може становити $\pm 4,6$ ppm, що означає, що виміряна частота може перебувати в діапазоні від 19999908 до 20000092 Гц.

Більше того, фактична вихідна частота може динамічно змінюватися через багато факторів, тому інженер не може просто виміряти фактичну вихідну частоту генератора і якось виправити її. Як і слід очікувати, вона буде змінюватися в залежності від температури, але ви можете здивуватися, дізнавшись, що в міру старіння пристрою частота повільно змінюватиметься з часом (процес, званий старінням) і може змінюватися на кілька частин на мільярд на день. Осцилятори будуть розглянуті докладніше у розділі 5 «Годинник, похибка часу і шум».[2]

Синхронізація частоти - це процес, при якому використовується інше, більш точне та стабільне джерело частоти, щоб змусити генератор працювати набагато ближче до його номінальної проектної частоти. Наприклад, точність генератора може підвищитися, скажімо, з $\pm 4,6$ ppm до ± 16 ppb (тепер між 19999999,68 і 20000000,32 Гц). Частота, як і раніше, буде дрейфувати, але набагато менше, ніж у автономного генератора, що працює без більш точного джерела з іншого джерела.

1.3 Синхронізація часу доби

Ви легко знайдете приклади синхронізації часу у повсякденному житті. Батьки можуть дозволити своїм підліткам піти в торговий центр самих, якщо вони пообіцяють знову зустрітися у певний час. Перш ніж дозволити їм піти, батько зазвичай запитує: Скільки у вас зараз часу? що є грубим методом забезпечення синхронізації годин. Звичайно, в наші дні всі вони носять мобільні телефони, тому встановлення часу зустрічей майже в минулому, та, крім того, всі наші телефони автоматично синхронізуються за часом для нас.

Однак, як тільки ви встановите правильний час, годинник повинен покладатися на свій осцилятор, щоб стежити за часом якнайкраще. Для генератора

з частотою 32768 Гц в кварцовому годиннику це означає, що кожного разу, коли кристал робить 32768 коливань, лічильник тикатиме більше однієї секунди і переміщатиме секундну стрілку на одне градування на циферблаті. Отже, чим вища точність частоти генератора (чим вона ближче до 32768 Гц), тим точніше годинник відраховуватиме час. Осцилятори з винятковою точністю частоти називаються атомним годинником.

Поняття тимчасового дрейфу зазвичай відноситься до точності часу, що повідомляється пристроєм, і того, наскільки воно змінилося за фіксований період часу - наприклад, точність кварцового наручного годинника може бути виражена як 1,5 секунди на день. Це означає, що через місяць після того, як гіпотетичний батько і підліток у торговому центрі погодили час на своєму годиннику, вони могли очікувати, що годинник не погодиться один з одним приблизно на 45 секунд.

Якщо набору пристроїв необхідно підтримувати більш точний час протягом тривалого часу, їм необхідний механізм автоматичної синхронізації часу, щоб компенсувати неточність частоти генератора. Існують різні механізми, які роблять це, і, хоча ви можете не помітити, це часто відбувається навколо вас, найчастіше у вашому ноутбучі чи мобільному телефоні. Інші годинники, особливо ті, що використовуються для громадських цілей (наприклад, залізничний годинник), синхронізуються за допомогою радіосигналу. [3]

За точність доводиться платити. Високоточний осцилятор (наприклад, атомний годинник) можна налаштувати один раз, і він підтримуватиме дуже точний час протягом тривалого періоду; Тим не менш, цей тип генератора дуже дорогий у покупці та обслуговуванні. Набагато більш економічним рішенням є встановлення більш дешевих «досить хороших» генераторів у наші пристрої та використання деякої форми тимчасової синхронізації для періодичної установки їх на правильний час. Цей компроміс буде розглянутий пізніше, оскільки він є важливим фактором при побудові мережі синхронізації: по суті, найкращий годинник у порівнянні з кращими механізмами корекції.

Тепер має бути очевидним, що для точного вирівнювання часу вам потрібна комбінація всіх форм синхронізації: частоти, фази та часу. Осцилятори повинні

обертатися з правильною частотою, годинник повинен цокати в потрібний момент, а дата на циферблаті повинна правильно відображати те, що всі вважають за правильний час.

1.4 Міжнародний атомний час (TAI)

Міжнародний атомний час або від французького Temps Atomique International (TAI) - світовий час, що визначається середньозваженим значенням всесвітньої мережі атомного годинника (більше 400 у 80 національних лабораторіях). Вчені в цих лабораторіях використовують безліч методів для дуже точного вимірювання різниці в часі між годинником, дозволяючи кожній лабораторії порівнювати час свого годинника з годинником інших лабораторій.).

TAI - це так звана монотонна шкала часу, що означає, що, оскільки вона була вирівняна за всесвітнім часом 1 січня 1958 00:00:00 (її «нульовий відлік часу», відомий як її епоха), вона ніколи не перескакувала за часом (як в деяких формах стрибка) і продовжує відлік вперед по одній секунді за раз. Він однорідний і дуже стабільний, що означає, що він не зовсім відповідає трохи нерівномірному обертанню та орбіті Землі. З цієї причини була потрібна інша шкала часу, крім TAI, яка більш точно відповідає нашим дням і рокам (хоча відмінності невеликі).

1.5 Як GPS може забезпечити хронометраж та синхронізацію?

Дуже потужним інструментом розподілу інформації про час (частота, фаза та час) є глобальна навігаційна супутникова система (GNSS), найвідомішою з яких є GPS. Багато документів за часом відносяться конкретно до GPS, але важливо знати, що існує безліч подібних систем, тому в цій книзі використовується загальний термін GNSS, за винятком випадків, коли він конкретно відноситься до будь-якої

однієї системи. У таблиці 1-1 показані найпоширеніші GNSS, включаючи деякі регіональні системи.

Концептуально GNSS досить прості, хоча за їх успіхом стоїть безліч складнощів, які виходять за рамки цієї книги. Ви можете думати про GNSS як про мережу атомного годинника, що літає по орбіті, і це абсолютно те, чим вони є (для GPS, на висоті 20 200 км над землею). Передавачі на супутниках використовують бортовий годинник для передачі сигналів синхронізації на Землю, так що розташовані нижче приймачі можуть визначати час, місцезнаходження та швидкість.

Ці супутники контролюють наземні станції та станції моніторингу, які гарантують, що супутники перебувають у правильному положенні, що вони передають правильні дані та що їх годинник точно синхронізований. Шкала часу, використовувана GPS, заснована на UTC (USNO), який, як ви читали раніше, є версією UTC від Військово-Морської обсерваторії США і вирівняний з точністю до наносекунди або близько від «реального» UTC. Отже, неважко використовувати відповідний приймач для отримання дуже точного уявлення часу UTC від GPS.

Приймач GPS у вашому мобільному телефоні, який зазвичай також містить приймач Galileo, одночасно захоплює сигнали GPS від декількох супутників і швидко визначає положення і швидкість. Також можна було б отримати час UTC (USNO) від GPS, хоча більшість телефонів отримують синхронізацію часу з мережі або Інтернету.

Однак існують спеціалізовані приймачі, які не призначені для визначення місця розташування або допомоги в переміщенні по світу, а призначені спеціально для надання точного джерела часу. Для відновлення точної інформації про час цих пристроїв потрібне лише підключення до антени, розташованої зовні (оскільки сигнали GNSS не проникають через стіни). Зазвичай ці приймачі також мають до трьох фізичних роз'ємів, які дозволяють кабелям передавати інформацію про синхронізацію на будь-який пристрій, який її потребує.

Три сигнали складаються з:

- Частота (яка синусоїда або прямокутна хвиля);

- Пульс (що представляє початок другої або фази);
- Час дня (рядок символів, що передає дату та час у форматі UTC).

Потім ці три сигнали можна використовувати для забезпечення синхронізації за частотою, фазою та часом для будь-якого найближчого обладнання. Оскільки GPS є всесвітньою системою і складається з безлічі супутників (нині 31), які знаходяться на орбітах, що перекриваються, покриття є глобальним і буде працювати в будь-якій точці Землі. Оскільки антена для приймача розміщується зовні або на даху, між приймачем і передавачем практично немає нічого, що могло б стати на шляху (за винятком густонаселених міських каньйонів). Отже, всі вважають зрозумілим, що GPS надзвичайно надійний і «завжди поруч», тому що він так добре працював протягом десятиліть, і багато користувачів часу і навігації покладаються на нього, у тому числі незліченні оператори мобільного зв'язку. [4]

Єдиним серйозним недоліком цих GNSS і те, що сигнал, який приймається землі, дуже слабкий і, отже, дуже чутливий до перешкод і перешкод. Оскільки інформація, що передається (принаймні, для цивільних користувачів) не зашифрована, також зростає небезпека того, що зловмисники підробляють сигнали, тим самим змушуючи одержувачів приймати неправдиві дані про час.

Багато експертів побоюються, що всі надто задоволені, думаючи, що GPS завжди буде там, хоча насправді він досить вразливий. До цієї теми повертаються під час обговорення варіантів розгортання синхронізації у глобальній мережі.

Точність визначається як близькість виміряного значення до фактичного (або прийнятого) значення. Наприклад, точність може вказувати, наскільки близько години залишалися до реального часу у форматі UTC або наскільки близько осцилятор залишався до номінальної частоти. Як було показано раніше, точність часу може бути виражена в термінах помилки часу за період (1 секунда на день) або частоти помилки в порівнянні з номінальною частотою (20 Гц для генератора 20 МГц або 1 ppm).

Точність визначається як близькість значень, що вимірюють деяку величину, один до одного, тобто, наскільки відтворювані та відтворювані виміряні значення. Іншим словом, що позначає точність, може бути стабільність, оскільки вона вказує,

наскільки добре вимір продовжує показувати те саме значення - незалежно від того, чи є це значення точним (тобто відображає реальне значення).

Уявіть, що генератор на 20 МГц коливається на частоті 20.200000 МГц щоразу, коли ви його вимірюєте. Оскільки він приблизно на 1% швидше, це навряд чи точний осцилятор, і якщо він використовується в годинах, результат часу також не буде точним, тому що ви очікуєте, що воно буде приблизно на 1% (або 864 секунди в день) занадто швидко. . Хоча він і не точний, він точний у тому сенсі, що його продуктивність є стабільною або стабільною.

Якщо щось подібне до генератора стабільно, це хороший кандидат як джерело частоти, тому що на нього можна поклатися, щоб забезпечити той же вихідний сигнал з часом. Стабільність лише показує, чи залишається частота (чи будь-яка інша характеристика) незмінною і дрейфує. Поведінка атомів цезію дуже стабільна, тому метрологи використовують його як джерело секунди та для збереження часу UTC.

Взявши цей генератор, який завжди обертається на частоті 20,2 МГц, можна було б побудувати з нього дуже точний годинник, оскільки розробник міг компенсувати 1% перевищення частоти. Це досягається або шляхом його уповільнення (наприклад, шляхом зниження вхідної напруги) або шляхом підрахунку 20,2 мільйона циклів в секунду, а не 20,0. Створення годинника навколо цього генератора і використання компенсації неточної (але стабільної) частоти призвело б до дуже точним годинникам.

Коли стабільний годинник поводить себе однаково весь день і кожен день, тоді має бути можливість компенсувати будь-яку неточність і зробити пристрій точним і стабільним. Навпаки, годинник, який коливається в діапазоні ± 5 хвилин від правильного часу кожен день, нестабільний, і хоча іноді вони можуть показувати правильний час, вони ніколи не можуть бути точними. Як кажуть, навіть зупинений (аналоговий) годинник двічі на день показує правильний час.

2 ВИКОРИСТАННЯ СИНХРОНІЗАЦІЇ ТА ТАЙМІНГУ

2.1 Використання синхронізації у телекомунікаціях

Синхронний зв'язок виникла з прийняттям цифрових схем TDM (таких як E1 та T1), що використовуються для з'єднання обладнання на великих відстанях. Щоб покращити пропускну здатність та якість цих схем, інженери розробили та впровадили синхронні форми зв'язку. Також було введено синхронізацію, що дозволяє мультиплексувати канали (наприклад, окремі голосові з'єднання) в єдине середовище зв'язку. Отже, мережевим інженерам необхідно було добре розбиратися в тактуванні, оскільки вони налаштовували маршрутизатори для використання таких ланцюгів як повсякденне завдання. Порівняйте це з сучасними мережевими інженерами, яким, можливо, ніколи не доводилося налаштовувати ланцюг E1/T1 у своїй кар'єрі, і тому вони не так добре знайомі із незмінною важливістю синхронного зв'язку. [5]

Ефективна робота цифрового транспорту, як і раніше, є найбільш поширеним застосуванням частотної синхронізації сьогодні в телекомунікаційній галузі, наприклад, у застарілих схемах TDM, наприклад, на основі E1/T1 або SDH та SONET. Однак частотна (а іноді і фазова) синхронізація широко застосовується в інших транспортних засобах передачі даних, таких як кабельні, пасивні оптичні мережі (PON) та мобільні пристрої, а також у сучасних пакетних мережах, таких як Ethernet (так званий синхронний Ethernet) та оптичних технологіях.

2.2 Застарілі мережі синхронізації

Частотна синхронізація дала переваги інженерам, які розробляють нові на той момент оптичні мережі, такі як SDH і SONET, оскільки вона дозволяла новим мережам передавати більше даних з меншими накладними витратами, ніж це було в попередніх схемах, таких як плезіохронна цифрова ієрархія (PDH). Він також

явно перевершував інші методи, такі як ті, які використовували виділені стартові та стопові біти для вказівки початку та кінця байта даних або інші методи, такі як вставка бітів. Різниця в тому, що синхронізація використовувалася для реалізації самого транспорту, а не була потрібна для деяких програм, що використовують транспорт (наприклад, телефонних голосових каналів).

Синхронні мережі (такі як SDH та SONET) відправляють дані по мережі, причому фізичний рівень мережі синхронізується із загальною частотою. Щоб це працювало, інженерам необхідно надати джерело точної частоти для всіх елементів у всій мережі, тому що генератори потребують допомоги, щоб залишатися точно вирівняними. Це дозволяє приймачеві даних маршрутизаторі читати вхідний потік даних з тією ж частотою, що і передавач, використовуваний при його відправленні.

Інженери досягають цього узгодження, використовуючи саму ланцюг даних як джерело синхронізації (лінійну синхронізацію), або вони побудували виділену незалежну мережу, використовуючи спеціалізовані пристрої синхронізації зі стабільними генераторами як зовнішні джерела частоти для кожного з маршрутизаторів. Рисунок 2.1 дає концептуальне уявлення про те, як частота розподіляється по мережі для вирівнювання кожного пристрою. З метою ясності посилання на стандарти ITU-T та ANSI (а тепер і ATIS), які визначають кожен із цих компонентів, були опущені.

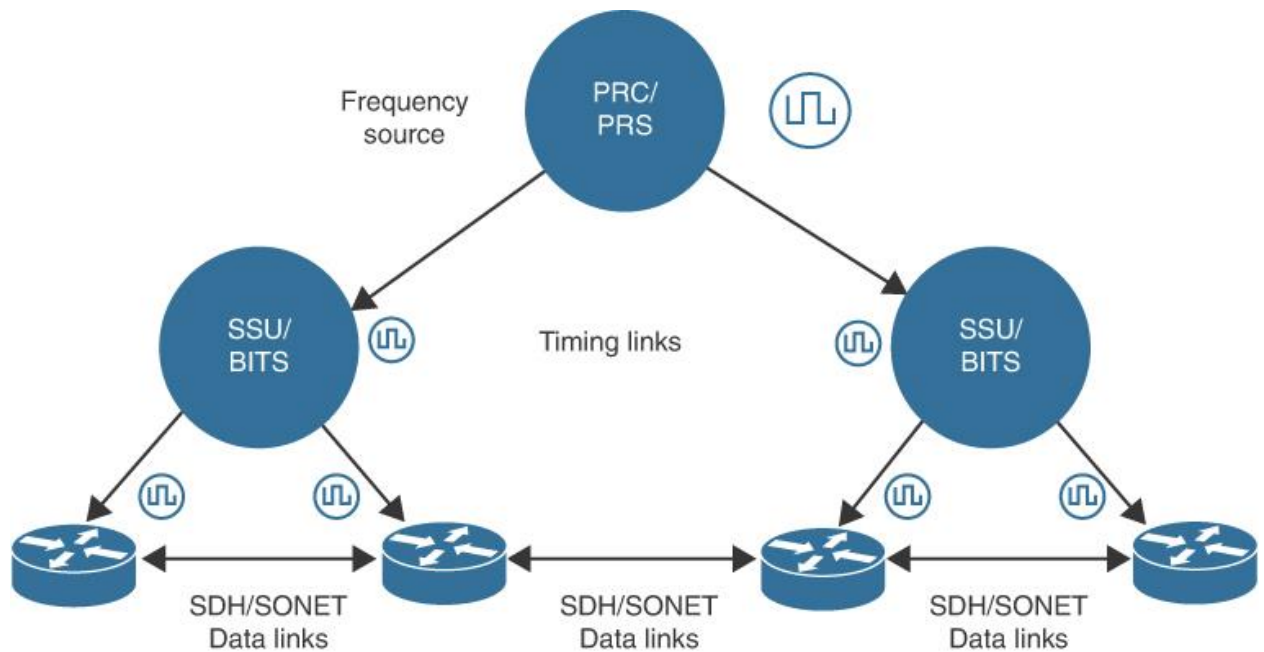


Рис. 2.1. Концептуальне уявлення про те, як частота розподіляється по мережі

Ви також повинні розуміти, що SDH та SONET використовують різну термінологію для еквівалентних елементів у кожній системі. Як приклад зверніть увагу, що стандарти відносяться до джерела частоти (наприклад, атомного годинника) як до первинного еталонного годинника (PRC) в SDH і як до первинного еталонного джерела (PRS) в SONET. Так само проміжний вузол відомий як блок джерела синхронізації (SSU) в SDH і інтегрований джерело синхронізації будівлі (BITS) в SONET. Для ясності, коли обговорюються елементи з обох систем, у цій книзі використовується термін SDH перед косою межею та SONET після неї (наприклад, SSU/BITS для проміжного вузла синхронізації). [6]

Джерелами частоти PRC/PRS є або атомний годинник, або пристрій, що поєднує приймач глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS) зі стабільним генератором. Пристрої PRC/PRS, засновані на атомному годиннику, можуть точно зберігати частоту протягом тривалого періоду часу, оскільки вони є стабільними джерелами частоти (на основі фундаментальної фізики атома цезію). Приймачі GNSS зазвичай включають високоякісний (стабільний) генератор, щоб мати можливість підтримувати точну частоту кожного разу, коли він тимчасово втрачає сигнал з космосу (процес, відомий як утримання).

Типовий пристрій SSU / BITS також включає обладнання, яке дозволяє йому підтримувати тактовий сигнал з більш високою точністю протягом періоду утримання, якщо воно коли-небудь втратить з'єднання з джерелом PRC / PRS. Інженери зазвичай реалізують пристрій SSU/BITS за допомогою апаратної частини, яка називається цифровою фазовою автопідстроюванням частоти (DPLL), керованої дуже стабільним рубідієвим або високоякісним кварцовим генератором. Таким чином, здатність пристрою SSU/BITS підтримувати частоту під час утримання краще, ніж у звичайного транспортного вузла SDH/SONET, але не така хороша, як PRC/PRS.

Якщо частота на одному кінці каналу передачі даних не точно поєднана з іншою, тоді приймаючий пристрій матиме нижчу або вищу частоту, ніж пристрій, що передає. Коли це відбувається, приймач не може прочитати та зберегти дані у своєму буфері з тією ж швидкістю, що й передавач. Зрештою, одержувач або чекатиме з порожнім буфером даних, які ще не прибутку (так звані незаповнені), або не зможе досить швидко зберегти їх у своєму буфері і втратить дані (так зване переповнення). Ці події призводять до втрати якості в ланцюгах даних і виявляються в тому, що мережеві інженери називають промахами, як показано на малюнку 2.2.

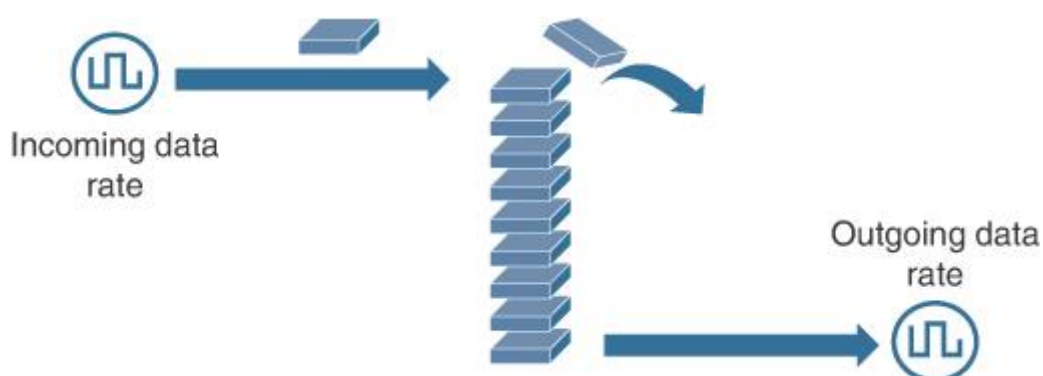


Рис. 2.2. Візуалізація втрати якості в ланцюгах даних

Швидкість прослизання пропорційна різниці частот між передавачем і приймачем, тому, якщо виміряти різницю між сигналами, можна обчислити очікувану кількість прослизувань за період часу. Високостабільні, близько

вирівняні джерела частоти можуть призводити до збою лише раз на кілька місяців, тоді як мережеві пристрої, що працюють без точного джерела частоти, можуть генерувати кілька зсувів в секунду.

Точне узгодження частоти кожному вузлу мережі має першорядне значення для якісної мережі. Промахи погіршують якість взаємодії з користувачем, призводячи до таких проблем, як клацання в аудіопотоках, неякісне відео, зависання тощо. Хоча використання TDM дедалі більше скорочується, створення джерела частот та його розподіл по мережі все ще дуже актуально для багатьох випадків використання у сучасних комунікаціях.

Наприкінці 1980-х регулюючі органи, виробники та оператори працювали над проектуванням та розгортанням мереж 2G для заміни існуючих аналогових систем. На той час у Європі Європейський інститут телекомунікаційних стандартів (ETSI) розробив мобільний стандарт Глобальної системи мобільного зв'язку (GSM), заснований на методах радіозв'язку множинного доступу з тимчасовим поділом каналів (TDMA). Більшість світу в кінцевому підсумку прийняла GSM як стандартизовану цифрову мобільну систему, але деякі країни, насамперед США, обрали іншу систему, більш сумісну з їх існуючими аналоговими системами. Оператори США прийняли кілька конкуруючих систем, але одна була заснована на радіотехнології множинного доступу з кодовим поділом каналів (CDMA) і продавалася як CDMAOne.

Цей ранній розкол у світі мобільного зв'язку за технологіями 2G зберігся у пізніших рішеннях щодо стандартів 3G. У той час як більшість світу перетворила свої системи GSM на систему 3G, розроблену організацією зі стандартизації 3GPP, звану Універсальною системою мобільного зв'язку (UMTS), оператори США вибрали іншу систему, засновану на CDMA. Ця система CDMA була набагато сумісніша з існуючими мережами 2G американських операторів на рівні сигналізації і тому мала сенс для взаємодії та міграції. Ця система, розроблена в рамках співпраці під назвою «Проект партнерства третього покоління 2» (3GPP2), була відома як CDMA2000 і була прийнята операторами в кількох інших країнах, таких як Корея, Китай, Японія та Канада.

Хоча радіозв'язок CDMA має деякі переваги, він вимагає фазової синхронізації для забезпечення правильної роботи, особливо для передачі мобільних телефонів від радіостанції в одному осередку до іншого (процес, званий передачею обслуговування). Це поставило операторів перед проблемою, як досягти дуже точної фазової синхронізації з вежами стільникового зв'язку, розкиданими по величезній території Північної Америки. [7]

Простою відповіддю було використання глобальної системи позиціонування (GPS). Більшість вишок стільникового зв'язку тоді були великими вежами передавача, іноді званими макросотами. Оскільки частота вихідного спектру 2G була досить низькою (~ 800-850 МГц), ці радіостанції забезпечували дуже хороше покриття на великій площі та відмінний прийом усередині будівель, оскільки низькі частоти, як правило, погано поглинаються. Ця комбінація великої дальності та хороших характеристик поширення дозволила операторам досить гнучко позиціонувати свої радіощогли.

Через відкриті місця оператору потрібно тільки встановити антену GPS нагорі вежі і підключити приймач GPS до радіостанції CDMA. На той час це був поширений підхід у Північній Америці. Коли наступним поколінням мобільних пристроїв була потрібна фазова синхронізація, оператори за межами США не наважувалися приймати рішення для вимірювання часу (GPS), яке, як вважалося, контролювалося урядом США. Це небажання надмірно покладатися на GPS дало операторам та організаціям зі стандартизації стимул до розробки альтернативних систем для розподілу фази та частоти.

Ще один фактор визначав, чи була потрібна фаза для мобільної мережі. Існує два методи (див. Рис. 2.3) для поділу повнодуплексних каналів (один висхідний і один низхідний) для радіосистеми. Одним з методів (і історично найбільш поширеним) був дуплекс із частотним поділом каналів (FDD), при якому висхідна лінія зв'язку (передача з телефону) і низхідна лінія зв'язку (прийом з вежі) використовували різні смуги - частота використовується для поділу дуплексних каналів. Цій системі була потрібна тільки проста частотна синхронізація, хоча

деяким додаткам, що працюють на радіостанціях FDD, може знадобитися фазова синхронізація.

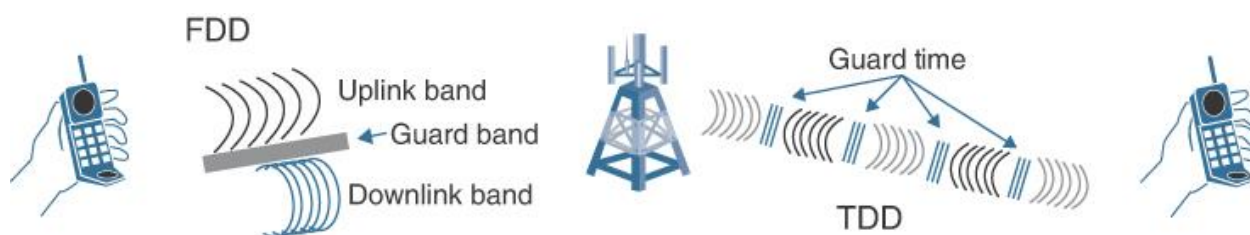


Рис. 2.3. Методи поділу повнодуплексних каналів

Інший варіант відомий як дуплекс з тимчасовим поділом (TDD), при якому канали висхідної та низхідної лінії зв'язку спільно використовують ту саму смугу, але обидва кінці лінії по черзі або передають, або приймають - час використовується для поділу дуплексних каналів. Оскільки TDD включає час, не дивно, що ця система потребує фазової синхронізації. TDD - переважаючий тип радіозв'язку для розгортання 5G.

2.3 Емуляція схеми

Хоча в наш час більшість мережевих інженерів звикли мати справу з оптичними транспортними системами та системами Ethernet, реальність така, що багато пристроїв по всьому світу все ще пов'язані між собою з використанням «застарілих» схем TDM, наприклад, на основі SDH або SONET. Не тільки кінцеві користувачі та великі підприємства, але й великі постачальники послуг, як і раніше, надають велику кількість каналів передачі даних, що базуються на технологіях типу TDM, з будівлями, що буквально заповнені обладнанням для його підтримки.

Проблема з постачальниками послуг, що використовують технологію TDM, полягає в тому, що більша частина цього обладнання вийшла з ладу і не підтримується і не виробляється виробниками обладнання. Проте переклад їхньої клієнтської бази на іншу транспортну технологію був би руйнівним та дорогим

проектом міграції. Більше того, більша частина обладнання на об'єктах клієнтів може підтримувати лише канали TDM типу E1/T1. Прикладами є мовні ланцюги на УАТС, цифрові транкові радіостанції для служб екстреної допомоги та сигнальне обладнання на залізничних колях. Перехід на канали передачі даних без TDM вимагатиме від замовників також перенесення свого обладнання. [8]

Рішення полягає в емуляції традиційної схеми TDM з використанням пакетної технології та IP/MPLS. З погляду кінцевого користувача успадковане прикордонне обладнання залишається в експлуатації, хоча тепер воно підключено через базову мережу IP/MPLS. Базовий канал E1/T1 завершується на спеціальному маршрутизаторі, а транспорт замінюється пакетним рішенням, як показано на малюнку 2.4. Цей метод відомий як емуляція схем (CEM).

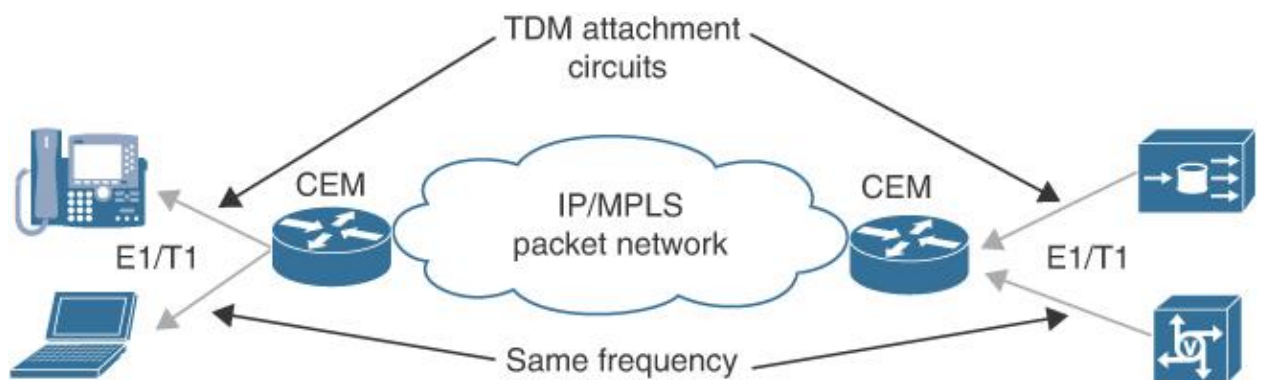


Рис. 2.4. Емуляція схем CEM

Емуляція схеми використовує маршрутизатор пакетів зі спеціалізованими інтерфейсними модулями TDM та виділений процесор на цих картах для виконання етапів пакетування та депакетизації між TDM та пакетом. Застаріле з'єднання, відоме як схема підключення (AC), підключається до інтерфейсного модуля TDM і схема TDM працює нормально. Вбудований процесор зчитує вхідний потік даних і кожні кілька мілісекундів відправляє ці дані в пакеті IP/MPLS на віддалений маршрутизатор CEM. На іншому кінці дані з пакета IP/MPLS поміщаються у фреймер і програються AC на цьому кінці. Звичайно, це дуплексний процес, тому передача та прийом відбуваються одночасно на кожному кінці ланцюга.

З попереднього обговорення ви знаєте, що схеми TDM потребують частотної синхронізації, щоб гарантувати, що приймач та передавач обробляють біти з однаковою швидкістю. Тепер, коли ми імітуємо раніше синхронну схему, пакетна мережа розриває частотний ланцюжок між передавачем та приймачем. Отже, нам потрібен інший механізм, щоб гарантувати, що змінний струм кожного кінця працює з однаковою частотою.

Існує два рішення (див. мал. 2.5) для впровадження частотної синхронізації в мережу з комутацією пакетів IP/MPLS. Один використовує SyncE, а інший використовує профіль PTP спеціально розроблений для заміни частотної синхронізації TDM на частотну синхронізацію на основі пакетів. Ці два рішення набули широкого поширення окремо або в комбінації.

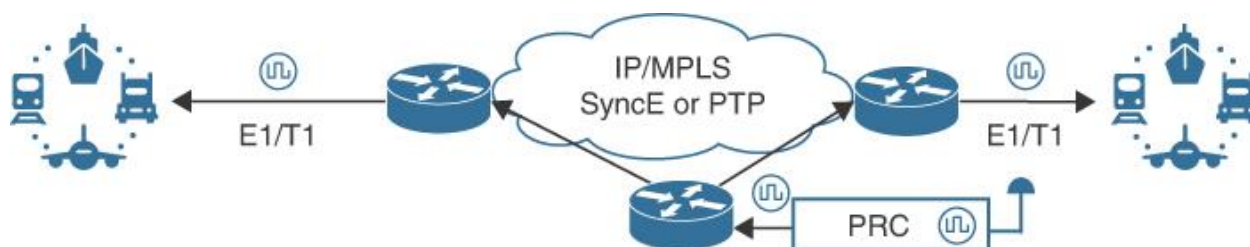


Рис. 2.5. Частотна синхронізація в мережах з комутацією пакетів IP/MPLS

Не тільки комерційні, державні та корпоративні клієнти вже зробили кроки із заміни всієї інфраструктури SDH/SONET на маршрутизатори CEM на основі пакетів, а й постачальники послуг передачі даних. Їхні клієнти каналу передачі даних навіть не здогадуються, що придбаний ними канал T1/E1 був переведений на передачу пакетів усередині базової мережі постачальника послуг (SP). Їхній канал TDM досягає лише найближчої точки присутності (POP) або локальної станції, де він перетворюється для використання пакетного транспорту для доставки у віддалене місце по мережі IP/MPLS SP.

3 КОНЦЕПЦІЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ ТА ТАЙМІНГУ В 5G

Мережева синхронізація включає розподіл часу і частоти або синхронізацію годин у різних географічних регіонах за допомогою мережі. Будь-яка кількість різних мережевих транспортних технологій, наприклад, заснованих на оптоволокну, кабелі або навіть радіо, може використовуватися передачі інформації про синхронізацію або у вигляді фізичного сигналу, або у вигляді даних. Основна мета - синхронізувати весь годинник, підключений до мережі, до єдиної загальної частоти та/або еталону часу.

Ця проблема вирівнювання розподіленого годинника широко вивчається, і для підтримки точної синхронізації використовуються різні методи. На рис. 3.1 показано поєднання технологій задля досягнення цієї мети. У цьому випадку посилення спочатку розповсюджується через супутникову систему, а потім передається на рівні землі з використанням тієї чи іншої форми мережі.



Рис. 3.1. Синхронізація за допомогою GNSS

Синхронізація також може бути фундаментальною вимогою багатьох технологій, що використовуються передачі даних по телекомунікаційній мережі. У синхронному цифровому зв'язку мережі вимагають, щоб кадри приходили на

приймаючий вузол у потрібний момент, щоб виділений часовий інтервал заповнювався та оброблявся правильно без втрати даних.

Оскільки кадри даних обмінюються між вузлами, підключеними до синхронної мережі, важливо, щоб годинник, який працює на цих вузлах, був точно синхронізований. Інакше дані зрештою дані почнуть шикуватися в чергу в найповільнішому місці, і дані будуть втрачені або скинуті.

Але, з іншого боку, є інші технології передачі, використовують асинхронні методи. [9]

В асинхронних мережах кожен вузол підтримує свій власний годинник, і немає жодного механізму управління, який координує роботу годинника в мережевих елементах. Зв'язок асинхронним каналом зазвичай більше орієнтована на байти або пакети, ніж на кадри. Ці мережі використовують методи (такі як стартові та стопові біти або преамбула) для визначення передачі сегмента даних. Вони також використовують такі механізми, як керування потоком, щоб запобігти перевантаженню ланцюга даними.

Наприклад, більш старі стандарти зв'язку, такі як RS-232, використовують стоповий та стартовий біт для позначення початку та кінця байта даних. Цей метод широко використовувався в часи комутованих модемів і часто використовувався для низькошвидкісних з'єднань по мідних дротах.

Деякі пізніші технології зв'язку, такі як багато типів Ethernet, використовують преамбулу, яка дозволяє приймаючій схемі узгодити свій приймач із частотою вхідного бітового шаблону. Як визначено у стандарті IEEE 802.3-2018, пункт 3.2.1:

Поле «Преамбула» - це 7-октетне поле, яке використовується, щоб дозволити схемі PLS (фізичного сигнального підрівня) досягти своєї синхронізації, що встановилася, з синхронізацією прийнятого пакета.

Цей механізм дозволяє узгодити приймальну схему із вхідним сигналом; однак існують інші вимоги до синхронізації, які важливі для такого посилання. Наприклад, у схемі може бути потрібна однакова швидкість передачі в обох напрямках, щоб зменшити перехресні перешкоди або перешкоди між двома потоками даних по сусідніх мідних дротах.

Для цього в мережах Ethernet з використанням мідних дротів можна вибрати один кінець ланцюга як ведучого, а інший кінець - як ведений. Передавач на провідному кінці буде використовувати свій автономний автономний генератор для передачі даних відомому. Потім приймач на веденому кінці використовує преамбулу, щоб узгодити частоту прийому з частотою вхідного сигналу (він відновлює частоту). Підлеглий пристрій використовує цю частоту, отриману з вхідного сигналу, частоти передачі від веденого пристрою назад до ведучого.

Таким чином, самі послання вирівняні за частотою, без централізованого управління синхронізацією у вузлі. Для отримання докладної інформації див. Пункт 28 IEEE 802.3, «Канальна сигналізація фізичного рівня для автоузгодження на крученій парі», пункт 40.4, «Підрівень підключення до фізичного середовища (PMA)» (для 1000BASE-T); та пункт 40.4.2.6, "Функція відновлення тактової частоти" (для 1000BASE-T).

Для Ethernet вимоги до точності частоти досить слабкі, зазвичай потрібна лише точність у межах ± 100 ppm. Різні технології та швидкості Ethernet можуть використовувати різні частоти - наприклад, 1 Gigabit Ethernet для неекранованої мідної крученій пари (1000BASE-T) має символічну швидкість 125 МГц. [10]

Але пам'ятайте, що кожне з'єднання узгоджує свою частоту на основі автономного генератора порту, вибраного як провідний для цього каналу. Таким чином, без центральної тактової частоти як джерело багатопортовий комутатор може опинитися в топології, в якій кожен порт є підлеглим і працює з трохи іншою тактовою частотою (хоча і в межах ± 100 ppm один від одного). Фактично кожен порт комутатора стає синхронним каналом «точка-точка».

За ідеєю, саме це відбувається з комутатором Ethernet, який не використовує синхронний Ethernet (SyncE) – кожен порт узгоджує свою швидкість передачі та прийому з портом на сусідньому комутаторі. Це означає, що це генератори, використовувані передачі, працюють автономно (не узгоджені з будь-яким сигналом опорної частоти).

SyncE виправляє це шляхом підключення передавача на кожному порту до загального генератора пристрою та дозволяє синхронізувати частоту цього

генератора з опорним годинником. Опорний сигнал надходить або через канал SyncE, або через зовнішнє джерело частоти, наприклад, синусоїдальний сигнал, що подається на порт вбудованого джерела синхронізації (BITS) в будівлі комутатора. Див. розділ синхронного Ethernet у розділі 6 «Фізична синхронізація частоти», щоб отримати докладнішу інформацію про SyncE.

3.1 Синхронні мережі

У синхронних мережах весь годинник синхронізується із загальним опорним сигналом. Існують різні підходи до синхронізації годинника в мережі; загалом вони поділяються на дві категорії - централізовані та децентралізовані методи управління.

Як показано на рис. 3.2, частина а, в методі централізованого управління інженер збирає годинник в ієрархію на основі відношення «ведучий-відомий» між мережевим годинником і віддаленим провідним годинником. У цьому підході кінцевий головний годинник (відомий у деяких випадках як грандмайстри) є остаточним еталонним годинником для кожного вузла в мережі.

В якості альтернативи, децентралізованому методі управління (рис. 3-2, частина б), кожен тактовий сигнал синхронізується зі своїми колегами для визначення найкращої якості. Наприклад, у підході взаємної синхронізації немає концепції головного годинника, і кожен тактовий сигнал сприяє підтримці мережевого хронування.

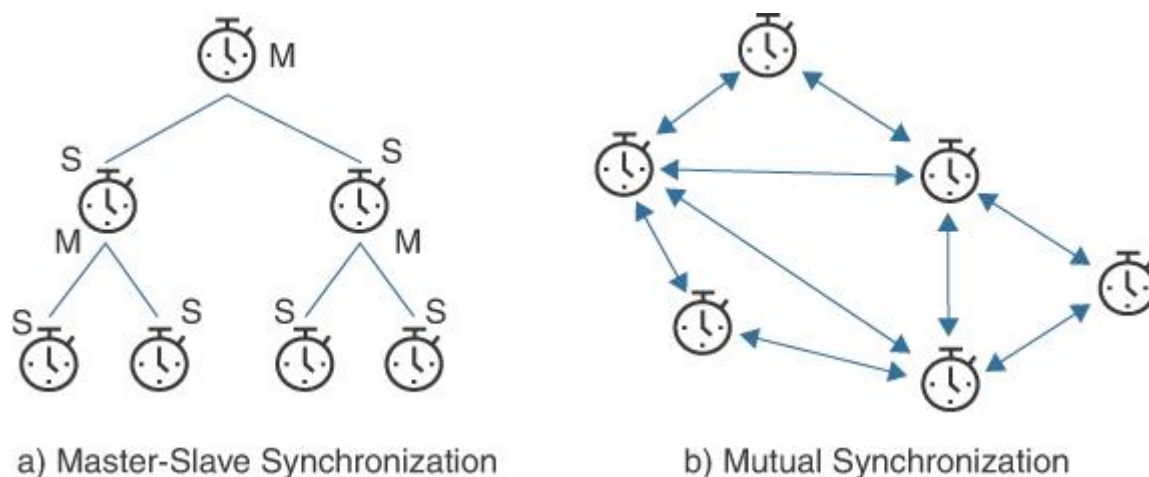


Рис. 3.2. Різні підходи щодо синхронізації годинників у мережі

Успадковані мережі з тимчасовим мультиплексуванням (TDM) використовують частотну синхронізацію, щоб гарантувати, що швидкість передачі бітів вирівняна, щоб уникнути втрати кадрів або прослизання між вузлами. Побудова ефективної, але доступної транспортної мережі заснована на розподіл частоти від декількох дорогих пристроїв (з високоякісними компонентами, такими як генератори) до мас пристроїв, виготовлених з використанням більш доступних компонентів.

3.2 Визначення частоти

Все, що обертається, хитається або тикає з регулярним часом циклу, можна використовувати для визначення часового інтервалу. Якщо рух регулярний, а інтервал повторення залишається стабільним, це формує основу для побудови годинника. Існують рухи пристрою або інші явища, які відбуваються природним чином на певній частоті, і пристрій (або електрична частина), що робить це, називається резонатором. В електроніці, коли до резонатора додається ланцюг подачі енергії, вона продовжує свою циклічну поведінку до нескінченності, і цей пристрій стає генератором.

Якщо тривалість одного коливання (період) відома і залишається стабільною, пристрій може точно виміряти довжину інтервалу часу, просто порахувавши такти.

Це причина того, що інженери з таймінгу кажуть, що годинник – це просто генератор плюс лічильник. Просто підключивши схему для підрахунку та запису кількості обертань, гойдалок або коливань, можна побудувати годинник і використовувати його для вимірювання часу.

Звідси випливає, що з вимірювань дуже малих інтервалів часу потрібні вищі частоти коливань. Електронна схема генерує ці вищі частоти, помножуючи стабільну вихідну частоту генератора деяким коефіцієнтом. Для ілюстрації візьмемо попередній приклад Ethernet. Щоб отримати сигнал з частотою 125 МГц передачі даних, схема множить вихідний сигнал кварцового генератора з частотою 20 МГц на 6,25, що дає 125 МГц. Інший спосіб думати про це полягає в тому, що на кожні 4 повних цикли введення від генератора припадає 25 повних циклів виведення ($4 \times 6,25$).

Очевидно, що пристрій, що використовується для вимірювання часового інтервалу, повинен працювати з набагато більшою частотою, ніж часовий інтервал, що вимірюється, і чим більше потрібно точності, тим вище швидкість. Вчинити інакше - це все одно, що виміряти розмір мікробів метровою лінійкою. Отже, коли інженерам необхідно точно виміряти час із точністю до мільйонних або мільярдних часток секунди, їм необхідно використовувати електронну схему, яка циклічно повторює не менше мільярдів разів на секунду. [11]

Частота визначається як кількість повторень події, що регулярно відбуваються, за одиницю часу. Стандартною одиницею вимірювання частоти є герц (Гц), який визначається як кількість подій або циклів за секунду. Частота швидко виникаючих сигналів вимірюється в Гц, де 1 кГц - це тисяча або 10^3 подій на секунду. Так само 1 МГц відповідає одному мільйону або 10^6 подій на секунду, а 1 ГГц - одному мільярду або 10^9 подіям на секунду.

У той час як частота – це кількість циклів за інтервал часу, період – це проміжок часу (тривалість), протягом якого рух завершує один цикл. Одне є зворотним до іншого - маятник, що розгойдується назад і вперед двічі на секунду, має частоту 2 Гц, але період 0,5 секунди. Математично ми описуємо це як

$$\text{Frequency}(f) = \frac{1}{\text{Period}(T)} \text{ or } f = \frac{1}{T} \quad (3.1)$$

Таким чином, генератори з періодами більше однієї секунди мають частоту менше ніж 1 Гц. Наприклад, схема, яка циклічно повторюється кожні 10 секунд, становить 0,1 Гц, кожні 1000 секунд – 1 мГц, а один раз на день – $1/86400$ Гц (11,574 мкГц).

Частота генератора, швидкість, з якої рухається годинник, є характеристикою, заснованою на фізичній конструкції та природних характеристиках компонента. Оскільки неможливо спроектувати генератори з однаковими характеристиками, кожен тактовий генератор коливатиметься з різною власною частотою - різниця може бути невеликою, але вона буде присутня (і, швидше за все, згодом теж зміниться).

Ви можете купити настільне обладнання для вимірювання частоти так званий частотомір. Частотоміри вимірюють кількість циклів коливань або імпульсів за секунду в періодичному електронному сигналі (у герцах). Частотоміри із сучасною технологією можуть вважати частоти вище 1×10^{11} Гц, що дозволяє точно вимірювати дуже короткі інтервали часу. Ці пристрої зазвичай використовуються у лабораторних умовах для перевірки точності часу.

Осцилятори на основі атомів цезію-133 широко використовуються як первинний еталонний годинник (PRC), щоб забезпечити дуже стабільне і точне джерело частоти. Щоб зробити з нього справжній «годинник», ви просто додаєте лічильник, який збільшується на 1 після виявлення 9192631770 циклів випромінювання цезію. Потім цей лічильник буде збільшуватися майже рівно один раз на секунду, майже ідеальний годинник (ідеальних немає).

Осцилятори на основі кварцових кристалів (див. Главу 5, «Годинник, похибка часу і шум»), будучи доступнішими, широко використовуються для передачі частотного сигналу в телекомунікаційних мережах. Хоча кварц є відповідним генератором, здатним підтримувати певною мірою стабільну частоту, він недостатньо точний для цифрового зв'язку і далеко не такий стабільний, як цезієвий годинник.

Саме розподіл опорного сигналу частоти від цезієвого PRC до всіх пристроїв мережі дозволяє вбудованому кварцовому генератору в кожному мережевому вузлі точно передавати частоту для безпомилкового зв'язку.

3.3 Визначення фазової синхронізації

Частота або темп – це характеристика, яку можна спостерігати та вимірювати, оскільки ви можете швидко визначити, чи грає музикант твір надто швидко чи надто повільно, шляхом незалежного спостереження та порівняння швидкості відтворення музики з темпом, записаним у музиці. рахунок. Може бути потрібне джерело опорної частоти, щоб визначити, чи відбувається щось занадто повільно або занадто швидко, але це можна визначити незалежно, порівнявши частоту з джерелом часу. Інший приклад - медсестра, яка вимірює пульс пацієнта, перевіряючи частоту серцевих скорочень по наручному годиннику.

З іншого боку, фаза неспроможна існувати як така; це завжди щодо еталонного годинника або еталонної шкали часу. Це означає, що вирівнювання фази засноване на дотриманні випередження, заданому джерелом фази, і ви не можете виміряти його як окрему метрику тільки щодо джерела. Продовжуючи аналогію, фаза, позначена диригентом, має відношення лише до гри оркестру, а інший оркестр, який грає деінде, має свою власну фазу.

Важливим фактором для фази є вимірювання того, наскільки близько локальна фаза збігається з фазою джерела фази або деякого незалежного еталона. Отже, ви могли б сказати, що машина А має зсув фази +100 нс щодо машини В, або машина В має зсув фази -250 нс порівняно з універсальним координованим часом (UTC), отриманим від GPS. Але немає сенсу говорити, що машина А має зрушення фази +200 нс (хоча можна припустити UTC).

Таким чином, фаза виражається як відносне усунення, хоча при вимірі щодо загального джерела часу, такого як UTC, вона часто розглядається як абсолютна. Ця різниця між відносним і абсолютним пов'язана з тим, що в деяких випадках

радіостанція в одному осередку може потребувати точного вирівнювання фази з сусідніми радіостанціями (відносний фазовий зсув). Але коли всі стільникові вузли в одній мобільній мережі необхідно вирівняти з вузлами в іншій мобільній мережі, тоді найпростіший спосіб досягти цього - узгодити фазу кожної радіостанції з джерелом абсолютного часу, таким як координований всесвітній час. Досягнення цього вирівнювання абсолютної фази означає, що вони одночасно вирівнюються по фазі відносно один одного.

У випадку, показаному на малюнку 3.3, тактові сигнали C_a , C_b , C_c та C_d мають однакову частоту, а C_e та C_f мають вищі частоти. Сигнали також зміщуються з фазовим імпульсом, який у випадку C_a , C_b , C_c , C_d та C_f генерується на передньому фронті кожної другої прямокутної хвилі. Ви можете уявити, що пульс може бути сигналом, що вказує, наприклад, "тік" секунди. Сигнали C_a і C_b вирівняні по фазі один щодо одного, а C_d і C_e також вирівняні по фазі, хоча C_e має подвійну частоту C_d (імпульс генерується на кожному четвертому наростаючому фронті для C_e).

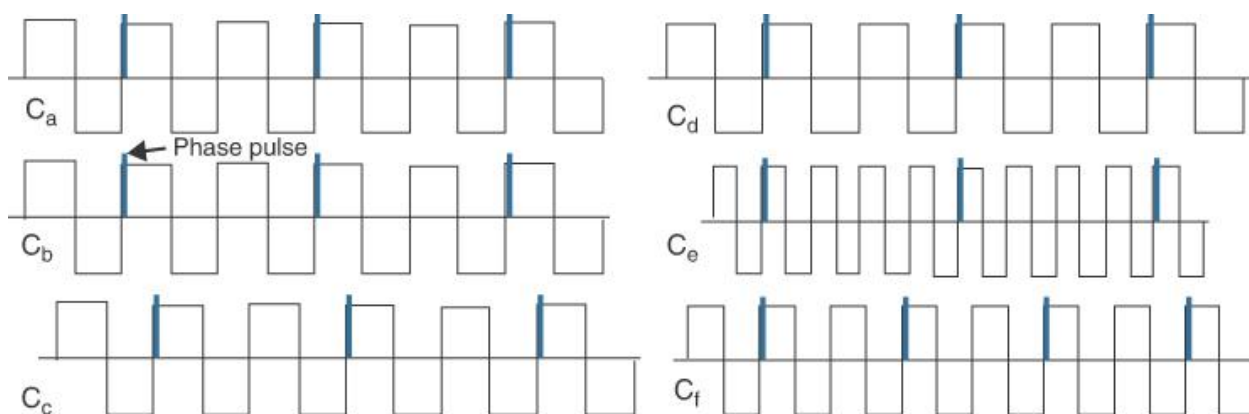


Рис. 3.3. Приклади тактових сигналів

Сигнал C_c має зсув фази щодо C_a і C_b , тоді як вихід фази C_f повністю не вирівняний, тому що частота занадто висока, а імпульс все ще генерується кожну другу хвилю. Зверніть увагу, що пристрої, що генерують сигнал C_d та C_e , вирівняні за частотою, хоча вони мають різні частоти; просто сигнал C_e коливається з частотою, удвічі перевищує частоту сигналу C_d .

Сенс малюнка 3.3 полягає в тому, щоб продемонструвати, що частота і фаза також залежать один від одного, і що після того, як фазове вирівнювання відбулося, підтримка дуже близького частотного вирівнювання також підтримуватиме близьке вирівнювання фази. [12]

Як показано на малюнку 3.3, для визначення фазового суміщення необхідно вибрати довільну точку повторювану для вимірювання фази або в якості точки для визначення фази за частотним сигналом генератора. Ця точка відома як значущий момент і зазвичай знаходиться десь на передньому або передньому фронті хвилі або імпульсу - важливим фактором є те, що вона має бути точкою, що повторюється. Конкретні приклади можуть включати момент, коли сигнал перетинає нульову базову лінію або досягає певного значення, наприклад, середньої точки переднього фронту.

Багато ранніх документів за стандартами, що стосуються розподілу сигналів синхронізації через фізичний рівень, визначають багато концепцій синхронізації в термінах значимих моментів. Але концепція нескладна; це просто точний момент часу, коли приймач визначає, що сигнал "прибув" або "виявлено". Аналогією може бути поштовий штампель листа, надісланого через поштове відділення; Істотним моментом надсилання листа є той момент, коли поштовий сортувальник скасовує друк.

На рис. 3.4 показані приклади значних моментів із пари ідеальних типів сигналів.

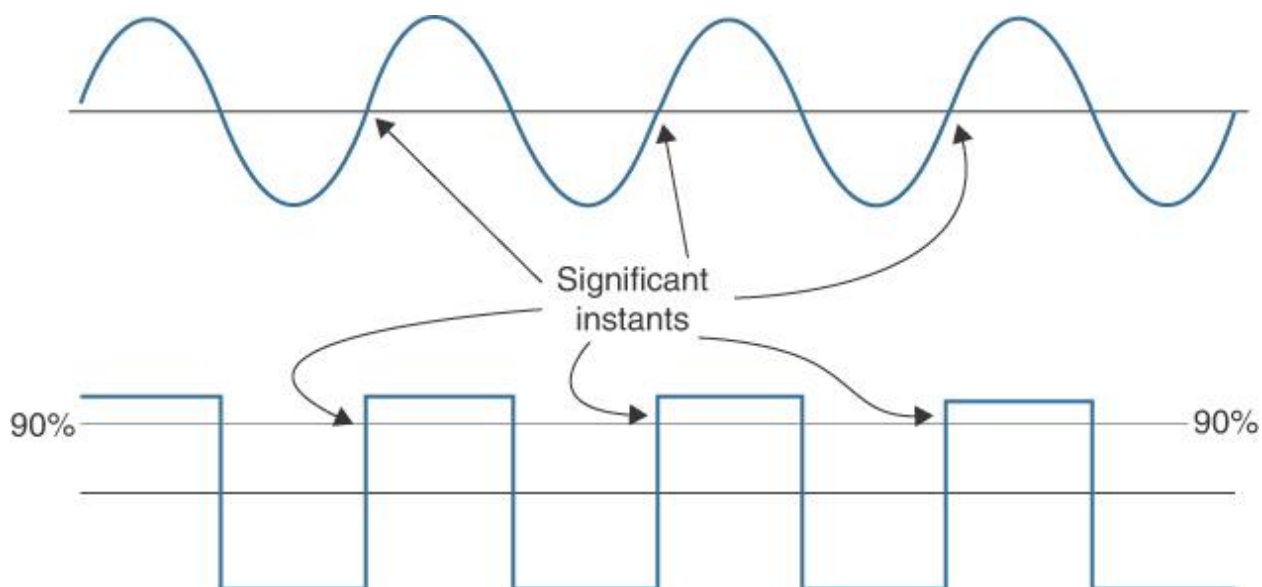


Рис. 3.4. Приклади значних моментів із пари ідеальних типів сигналів

Коли два сигнали мають важливі моменти часу, що відбуваються одночасно, вони вирівнюються по фазі.

Зверніть увагу, що прямокутна хвиля (яка може мати максимальну напругу 5 В) ніколи не може миттєво перейти від -5 до $+5$ В, оскільки електроніки для цього не існує. Завжди буде крихітне тимчасове вікно, протягом якого сигнал втратить негативну напругу і набуде нової позитивної напруги. Час, необхідне підвищення сигналу з низького рівня до високого і назад, називається часом наростання і спаду відповідно. Таким чином, передня та задня кромки ніколи не бувають вертикальними – передня кромка злегка нахилиється вправо, а задня кромка злегка нахилиється вліво.

Якщо фаза ідеально не вирівняна, виникає вимірна фазова помилка, відома як фазовий зсув, як показано на малюнку 3.5.

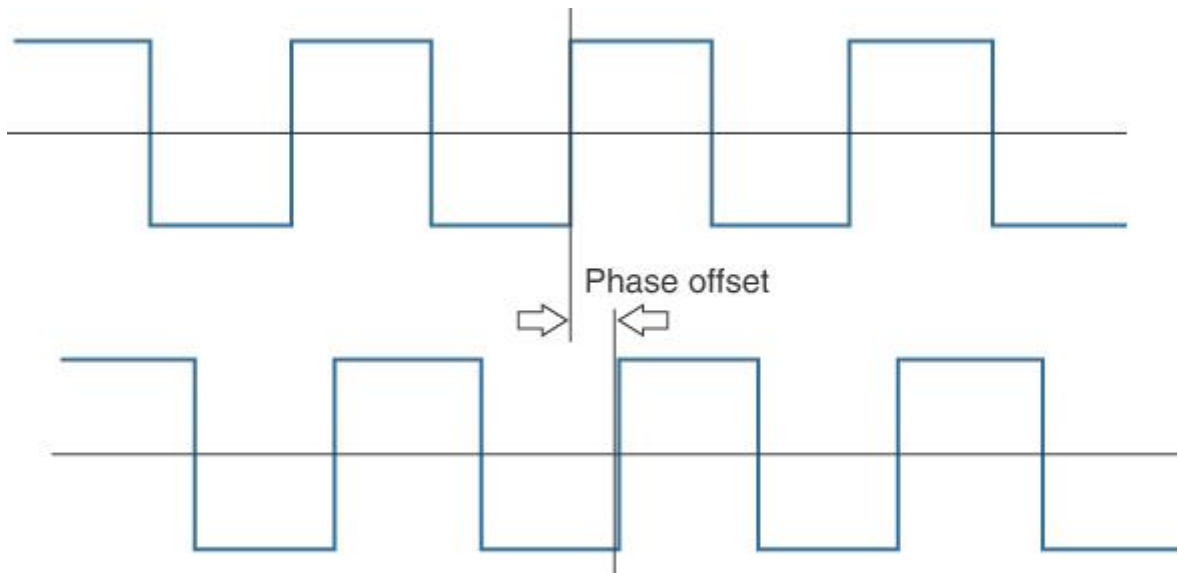


Рис. 3.5. Приклад фазового зсува

Висловлюючи усунення фази математично, припустимо, що час, що повідомляється годинами СА в деякій ідеальний момент t , дорівнює $CA(t)$. Різниця між ідеальним годинником, який може бути UTC (або його наближенням), і часом, заданим годинником СА, називається зміщенням годинника і зазвичай позначається малою грецькою літерою тета наступним чином:

$$\theta = C_A(t) \quad (3.2)$$

Хоча це можна розглядати як абсолютне зміщення годинника, оскільки воно порівнюється з загальноприйнятою шкалою часу, насправді це просто ще одне відносне зміщення порівняно з UTC. Зміщення між будь-якими двома мережними годинами, відносне зсув, визначається як

$$\theta_{AB} = C_A(t) - C_B(t) \quad (3.3)$$

3.4 Синхронізація із пакетами

У пакетних мережах інформація про синхронізації передається від головного годинника пакета до підпорядкованого годинника пакета за допомогою періодичного обміну даними між вузлами. Інформація про час представлена у вигляді тимчасових міток та, при необхідності, обмінюється за допомогою пакетів.

Протокол точного часу (РТР) викликає пакети з відмітками часу у повідомленнях про події передачі та прийому. [13]

Як тільки знову згенерований пакет має мітку часу на стороні, що передає, пакет починає «старіти», і непотрібна затримка додає до цього старіння. Час між відправкою пакета та записом часу його отримання критично за часом і має бути мінімізовано. Неминуча затримка через відстань передачі прекрасна, тому що двосторонній часовий протокол може це оцінити, але наявність пакетів у черзі буфера в очікуванні часового інтервалу передачі лише збільшує неточність.

На малюнку 3.6 показані деякі основні характеристики синхронізації, розподіленої на пакети. По-перше, це корисне навантаження, яке містить інформацію про час. Щоб пакет міг пройти канал зв'язку, корисне навантаження міститься у верхній і нижній колонтитули (позначені відповідно як Н і F на рис. 3.6). Оскільки затримка кожного пакета в цих типах мереж не є детермінованою, критичні за часом пакети, що періодично відправляються, будуть різнитися за часом передачі - так званої зміни затримки пакета (PDV). PDV є серйозною проблемою при розгортанні пакетного розподілу часу через його вплив на точність відновленого годинника.

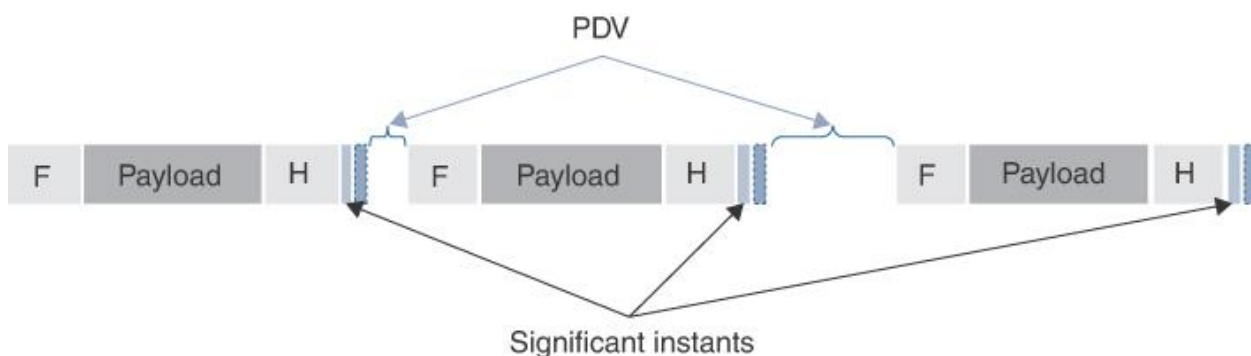


Рис. 3.6. Основні характеристики синхронізації

Ще один фактор, який необхідно визначити, - це те, коли пакет «відправляється» або «прибуває». Це визначається угодою у тому, що одне точне місце повідомлення є важливим моментом. Позначка часу повинна представляти час, коли цей важливий момент проходить контрольну точку синхронізації годин.

За згодою, місцезнаходження вважається кінцем обмежувача початку кадру, але може бути визначено по-різному у будь-якій даній пакетної технології, за умови, що визначення застосовується послідовно.

3.5 Джиттер і блукання

Коли синхронізуючий сигнал (технічно значущий момент цього сигналу) показує короткострокові високошвидкісні відхилення від ідеального положення, це називається джиттером. З іншого боку, повільні, довгострокові зміни у часі відомі як блукання. Таким чином виникає питання, що вважати «короткостроковим».

Відповідно до ІТУ-Т (G.810), поділ між джиттером і дрейфом для розподілу фізичного часу становить 10 Гц, тому зміни, які відбуваються на частоті 10 Гц або вище, називаються джиттером, а коливання нижче 10 Гц. Гц називають дрейфом. Методи на основі пакетів, такі як RTP, можуть використовувати інше обмеження (0,1 Гц), але знайте, що буде формальне визначення. [14]

Малюнок 3.7 ілюструє ефект джиттера. Будучи короткостроковими варіаціями сигналу, джиттер може бути відфільтрований або математично згладжений, так що вхідний сигнал синхронізації відстежується тільки для довгострокових тенденцій, а кожна короткострокова зміна не використовується негайно для оновлення стану локального осцилятора. Очевидно, якщо ці короткострокові зміщення занадто великі, це створює проблеми при вибірці, декодуванні та відновленні інформації про час.

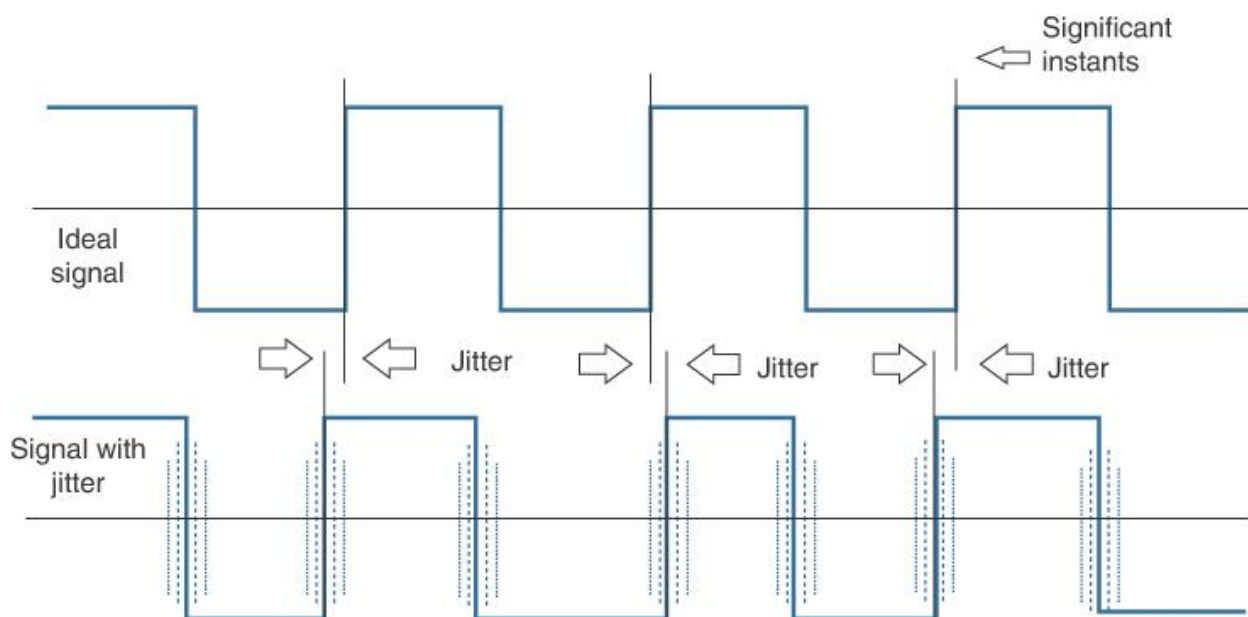


Рис. 3.7. Ефект Джиттера

З іншого боку, блукання – це довготривалий ефект, тому його не можна ігнорувати. Підлеглий годинник, що отримує синхронізуючий сигнал від головного годинника, не можуть вирішити «вторинно вгадати» точність даних від головного годинника і ігнорувати (в певних межах) введення. Це дуже небезпечне припущення, оскільки весь сенс мережі синхронізації полягає в тому, щоб передавати точніший годинник веденим пристроям з меншою точністю. Єдиний виняток – якщо вхід повністю виходить за межі діапазону очікуваних значень та виходить за межі допуску веденого годинника.

Рисунок 3.8 дає ілюстрацію дрейфу у сигналі синхронізації, показуючи, що нижній сигнал спочатку відстає від верхнього сигналу, а потім випереджає його (показано стрілками). Зауважте, що оскільки час збільшується вправо по горизонтальній осі, значний момент, переміщений вправо, знаходиться позаду, а не перед іншим сигналом.

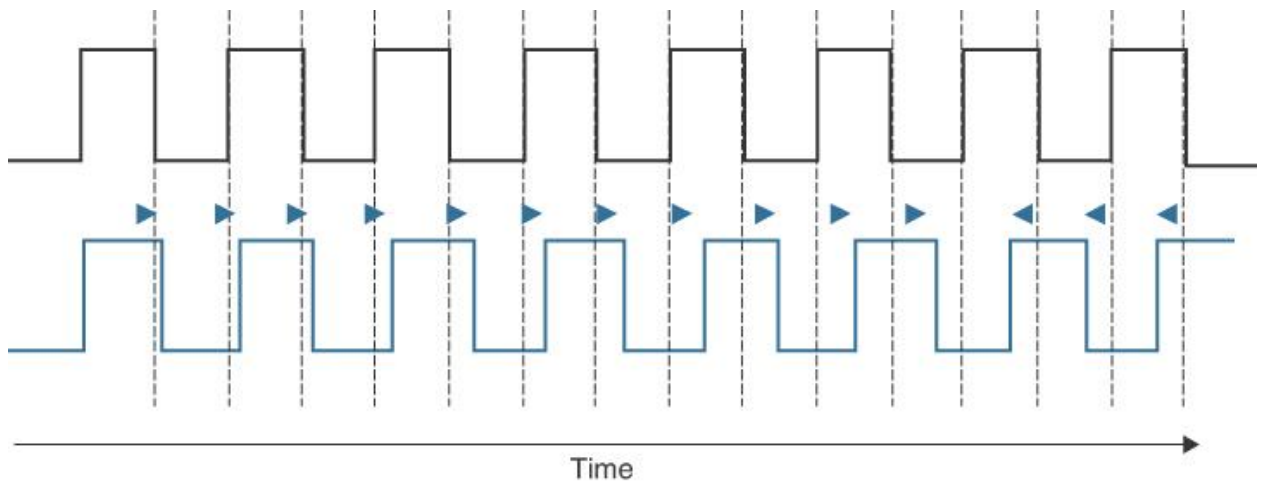


Рис. 3.8. Дрейф у сигналі синхронізації

Кожне чутливе до часу додаток має власні певні мінімальні вимоги до точності фази для безперервної роботи. Ви можете визначити вимогу декількома способами:

- Максимально допустиме зсув від опорного годинника;
- Зміщення між ведучим і веденим годинником;
- Відносне зміщення між двома веденими годинами.

Отже, важливо відстежувати ці зміни та використовувати механізми для мінімізації або часткового видалення помилок із сигналу синхронізації. З цією метою стандарти визначають робочі параметри для різних показників дрейфу фази та джиттера у мережному обладнанні, які можуть включати наступне:

- Стійкість до помилок введення від висхідного сигналу;
- Межі помилки, що генерується на виході годинника;
- Кількість помилок, що передаються через обладнання.

Стандарти ITU-T визначають характеристики обладнання як для фізичного рівня, так і для пакетного розподілу синхронізації [15]

Щоб підтримувати точне тимчасове зсув між мережними пристроями, потрібен механізм, який постійно порівнює фазу і час з еталоном і коригує будь-які зсуви. Але для цього мережний пристрій повинен знати, що він підключений до

якісного джерела частоти, фази та часу. І з цієї причини він повинен мати можливість відстежувати якість тактових сигналів до їхнього джерела.

3.6 Рівні частотних тактових імпульсів за стандартом ANSI

Частота розподілу тактових сигналів визначається на основі їх характеристик, і існує кілька категорій тактових імпульсів, що використовуються у всій мережі розподілу частот, і численні організації стандартизації класифікували ці категорії.

Один із підходів, прийнятих Американським національним інститутом стандартів (ANSI), полягає в тому, щоб класифікувати характеристики тактових генераторів за чотирма рівнями, відомими як рівні шарів, причому рівень 1 є найвищим, а рівень 4 - найнижчим рівнем продуктивності. Зверніть увагу, що це не те визначення страти, яке використовується в протоколі мережного часу (NTP). [16]

Для північноамериканського ринку стандарт ANSI, що спочатку називався T1.101, «Стандарти інтерфейсу синхронізації для цифрових мереж», був уперше випущений у 1987 році. Він визначав вимоги до точності та продуктивності для ієрархії годинника в мережі синхронізації. Остання версія T1.101 називається ATIS-0900101.2013 (R2018). Рисунок 3.9 ілюструє ієрархію рівнів страти від T1.101

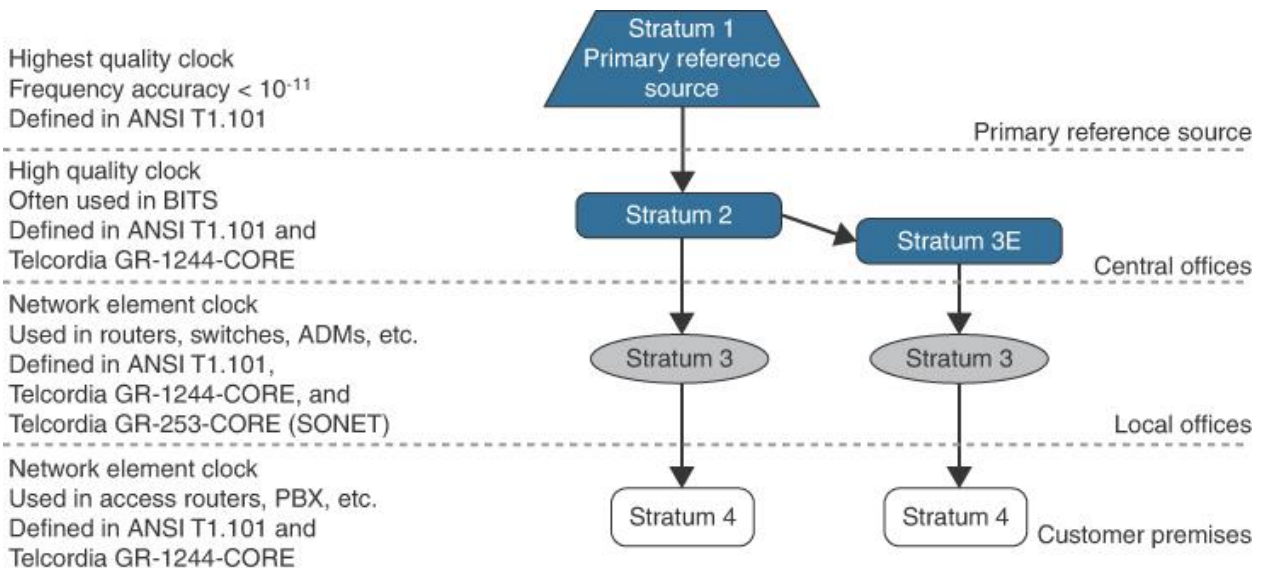


Рис. 3.9. Ієрархія рівнів страти від T1.101

Вершиною піраміди синхронізації є те, що T1.101 називає первинним еталонним джерелом (PRS) або те, що світ SDH ITU-T називає PRC - далі слід детальніше про підхід ITU-T. Завдання PRS - надати сигнал опорної частоти іншим годинникам в мережі або частині мережі. Це еквівалентно годинникам страти 1, і їх вихід керує іншими годинниками нижче за ієрархією, а саме шарами 2, 3 і 4. Години страти 1 і PRS мають однакову точність, і ці терміни часто використовуються як взаємозамінні.

Тут слід зазначити одну технічну деталь, тому що рівень 1 і PRS - це не те саме. Різниця в тому, що годинник страти 1 за визначенням автономний (тобто не вимагає вхідного сигналу). Це означає, що нормальний режим тактових імпульсів рівня 1 є автономним, а не заблокованим, оскільки він не має опорного сигналу для захоплення або блокування (будучи автономним).

Однак PRS може бути автономним, так і ні. Наприклад, PRS на основі приймача GNSS не є автономним (коли сигнал GNSS зникає, якість погіршується нижче рівня 1), і це не рівень 1 без наведення GNSS (бо він, ймовірно, не має цезієвого генератора) . Але він простежується як по годині страти 1, так і до джерела UTC (у системі GNSS), і він так само точний, як годинник страти 1, навіть незважаючи на те, що це не годинник страти 1.

З іншого боку, високоточний годинник, заснований на цезієвому генераторі, який може задовольнити вимоги до продуктивності рівня 1, є комбінацією PRS, годинника шару 1 і автономного годинника.

T1.101 визначає рівні страти на основі параметрів робочих характеристик годинників, таких як:

- Точність холостого ходу: максимальне довгострокове відхилення від нормальної частоти без використання будь-якого зовнішнього завдання (наприклад, $1 \times 10 \times 11$ від PRS);
- Стабільність утримання: максимальна зміна частоти щодо часу, коли годинник втрачає зв'язок зі своїм еталонним годинником і намагається підтримувати максимальну точність (з використанням даних, отриманих під час блокування). Не застосовується для PRS, тому що він працює автономно;
- Діапазон втягування: максимальне зсув між опорною частотою, доступною веденому пристрої, і заданою номінальною частотою, яка все ще дозволяє веденому пристрої досягти стану блокування. Не має відношення до PRS, тому що він не має вхідного посилення;
- Діапазон утримання: максимальне зміщення між опорною частотою, доступною веденому пристрої, і заданою номінальною частотою, яка все ще дозволяє веденому пристрої підтримувати стан блокування, коли опорний сигнал змінюється у всьому допустимому діапазоні частот. Крім того, це не стосується PRS, тому що в нього немає вхідного посилення;
- Wander: Довгострокові варіації сигналу (стосовно виходу PRS), де частота зміни менше 10 Гц;
- Фазові перехідні процеси: характеристика помилки часового інтервалу (TIE) годинника під час перебудови мережі або перемикання між опорними сигналами.

Для годин страти 1 як автономне джерело краще використовувати генератори цезію; однак розгортання цезієвого годинника в мережі зазвичай не виконується через високу ціну, а також надмірні витрати на обслуговування та експлуатацію.

Отже, найбільш поширені тактові генератори PRS засновані на приймачах GNSS (у поєднанні з гарним ОСХО усередині приймача).

Годинник Stratum 2 (годинник G.812 типу II в номенклатурі ІТУ-Т) є високоякісним годинником, який забезпечує точне розподілення часу і синхронізацію в цифрових мережах і найчастіше зустрічається в спеціалізованому обладнанні для синхронізації, такому як системи BITS для мереж ANSI і SSU для Мережі ІТУ-Т. Часто години страти 2 засновані на генераторі рубідію.

Тактові генератори рівня 3E (ІТУ-Т G.812, тип III) і рівня 3 (G.812, тип IV) зазвичай розгортаються в мережевому обладнанні вищої якості, яке, як очікується, надаватиме інформацію про синхронізацію пристроїв у нижній частині ієрархії, причому рівень 3E має кращу продуктивність, ніж шар 3 (вони повинні мати кращі характеристики утримання та жорсткіші вимоги до фільтрації дрейфу). [17]

Системи годинника Stratum 4 і 4E розгорнуті на кінцевому пристрої в ієрархії синхронізації. Для цього рівня стабільності утримання не визначено. Системи синхронізації Stratum 4 або 4E не рекомендуються як джерело синхронізації для будь-якої іншої системи синхронізації.

Знову зверніться до малюнку 3.9, де наведено загальні відомості про загальні типи годин, а також про те, де вони визначені та використовуються.

3.7 Годинник частоти, фази та часу

Коли тема переходить від частоти до фазової та тимчасової синхронізації, годинник, який забезпечує еталонний сигнал частоти, часу та фазової синхронізації для іншого годинника в мережі або частині мережі, називається первинним еталонним годинником часу (PRTC). Додавання слова «час» має дати натяк на те, що цей вихідний годинник враховує фазу і час, а не тільки дуже стабільну форму частоти.

PRTC зазвичай складається з деякої форми приймача GNSS, який також може бути пов'язаний із високоточним автономним джерелом частоти PRC/PRS.

Автономне джерело зазвичай є деякою формою атомного годинника і забезпечує розширене точне утримання у разі переривання сигналу GNSS. Це функція приймача GNSS, що дозволяє відстежувати джерело UTC, яке також може використовуватися для калібрування часу на атомному годиннику.

Автономний автономний атомний годинник може бути PRTC, але спочатку їм потрібна деяка форма калібрування, щоб вирівняти його з UTC, тому що джерело частоти не має поняття про час. Немає сенсу мати найточніший і стабільніший годинник, якщо він не налаштований на правильний час. Знову ж таки, це калібрування може виходити від приймача GNSS або деякого опорного сигналу, що надається як послуга (у багатьох випадках) національною фізичною лабораторією.[18]

ITU-T має рекомендації, які визначають продуктивність та характеристики різних рівнів продуктивності PRTC. Відповідно до введення покращеної версії PRC, тепер також є вдосконалений первинний еталонний годинник (ePRTC), що пропонує більш точне джерело фази / часу. Ці годинники вказані в ITU-T G.8272 (PRTC) та G.8272.1 (ePRTC) і можуть розглядатися як еквіваленти фази/часу G.811 та G.811.1 для годин PRC та ePRC.

3.8 Пакетний годинник

У мережі з комутацією пакетів головний годинник є джерелом часу для підключених мережевих елементів нижче в ієрархії синхронізації, а пакетний сигнал, згенерований головним годинником, надається веденим нижче годинникам. Цей годинник згадується в деяких документах ITU-T як тактові імпульси обладнання на основі пакетів (PEC), причому один з них є провідним пристроєм PEC (PEC-M), а інший - провідним пристроєм PEC (PEC-S). Для отримання додаткової інформації див. ITU-T G.8265.

У будь-якій даній частині мережі RTP завжди є єдиний головний годинник, який розподіляє сигнали синхронізації часу на інший годинник в мережі. Цей

головний годинник називається гросмейстерським (GM) годинником, і у нього буде PRTC, що забезпечує стабільне джерело частоти і простежуваність до всесвітнього координованого часу. Основне правило полягає в тому, що оскільки це гросмейстер, він не може отримувати інформацію про час від іншого годинника (крім, звичайно, посилання PRTC).

Пам'ятайте про різницю між годинником PRTC та GM. PRTC – це джерело частоти, фази та часу (узгоджений з UTC), а GM – це функція синхронізації пакетів RTP – він надає пакети RTP з відмітками часу. Ці дві різні ролі можуть бути розміщені у різних пристроях; об'єднані в єдиний пристрій (PRTC+GM); або вбудовані в мережевий елемент, такий як комутатор або маршрутизатор.

RTP визначає інтерфейс пакетів, званий портом, який за звичайних операціях виконує основну роль залежно від свого стану:

- Порт у стані ведучого: Головний порт на годиннику передає пакетний сигнал часу на ведений порт на годиннику спадного потоку;
- Порт у підпорядкованому стані: підлеглий порт отримує цей сигнал від провідного порту висхідного напрямку.

RTP визначає будь-який годинник з одним портом, що веде або ведеться, як звичайний годинник (OC). Отже, GM у мережі RTP – це OC, оскільки він має лише один головний порт. Зазвичай підлеглий пристрій внизу ієрархії також є звичайним годинником, тому що воно може бути тільки веденим годинником і має один підлеглий порт.

Однак є годинник з декількома портами, які підтримують обидві функції - бути провідним годинником для тактових імпульсів низхідного потоку, а також підлеглими для тактових імпульсів висхідного потоку. Такий годинник відомий як прикордонний годинник (BC). RTP BC має можливість відновлювати час, отриманий на підпорядкованому порту, використовувати його для дисципліни своїх власних схем синхронізації та розподіляти його за підключеними підлеглими мережевими елементами. На рис. 3.10 показані різні порти та типи годинників

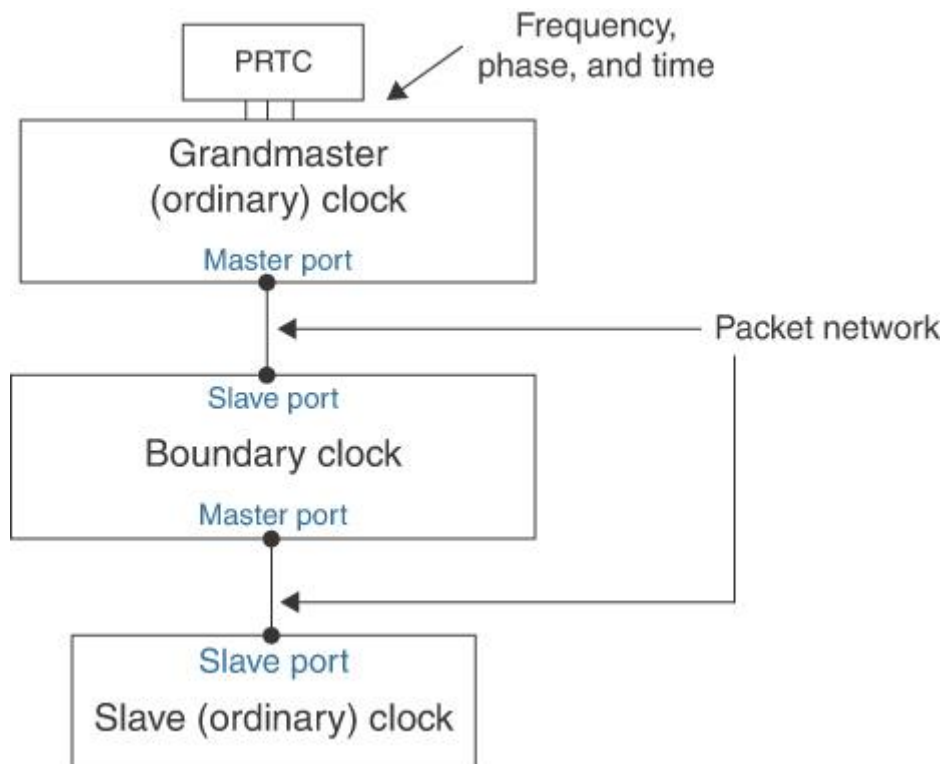


Рис. 3.10. Приклад прикордонного годинника

Зверніть увагу, що порт PTP - це логічний об'єкт на годиннику PTP, який має ряд можливих станів, найбільш важливими двома з яких є те, чи він працює як ведучий або ведений. Це не має нічого спільного з мережевими інтерфейсами (іноді також званими портами) на маршрутизаторі або іншому пристрої. Порт PTP – це логічний об'єкт, який бере участь у потоці повідомлень синхронізації PTP. У деяких реалізаціях PTP порт PTP може відповідати фізичному мережному інтерфейсу, але навіть у цьому випадку ви повинні розглядати його як окремий об'єкт повністю. [19]

3.8 Транспорт часу та синхронізації

Розподіл часу з різних середовищах передачі може бути виконано декількома способами. Для розподілу синхронізації часу доступні в основному три категорії рішень:

- Фізичний рівень: розподіл частот у SDH/SONET і SyncE, і навіть цифрова абонентська лінія (DSL), пасивна оптична мережу (PON), кабель DOCSIS тощо;
- Розподіл з урахуванням пакетів (рівень 2 і рівень 3): NTP, PTP, White Rabbit, адаптивне відновлення тактової частоти (ACR) тощо;
- Радіо або супутникові навігаційні системи: системи GNSS, а також інші радіосистеми, такі як LORAN-C, IRIDIUM, WWVB, DCF77 та багато інших.

4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО СИНХРОНІЗАЦІЇ МЕРЕЖ 5-ГО ПОКОЛІННЯ

Існують різні типи рекомендацій, написані для різних цілей, тому важливо знати, які рекомендації потрібно використовувати і для яких цілей. Вони мають багаторівневий підхід, починаючи з рекомендацій верхнього рівня, які визначають наскрізну проблему, яку необхідно вирішити, а також допущення та вимоги, які слід використовувати під час її вирішення. Наступні рекомендації відносяться до різних рівнів та аспектів вирішення синхронізації. На рис. 4.1 показано, як ці рекомендації підтримують одна одну.

Документи з архітектури встановлюють припущення та визначають проблему. Документи з мережевих обмежень потім визначають бюджет наскрізної продуктивності. Документи обмеження обладнання визначають продуктивність кожного компонента в ланцюжку. Знову ж таки, є певний збіг, і межі іноді нечіткі, але це загальний підхід.

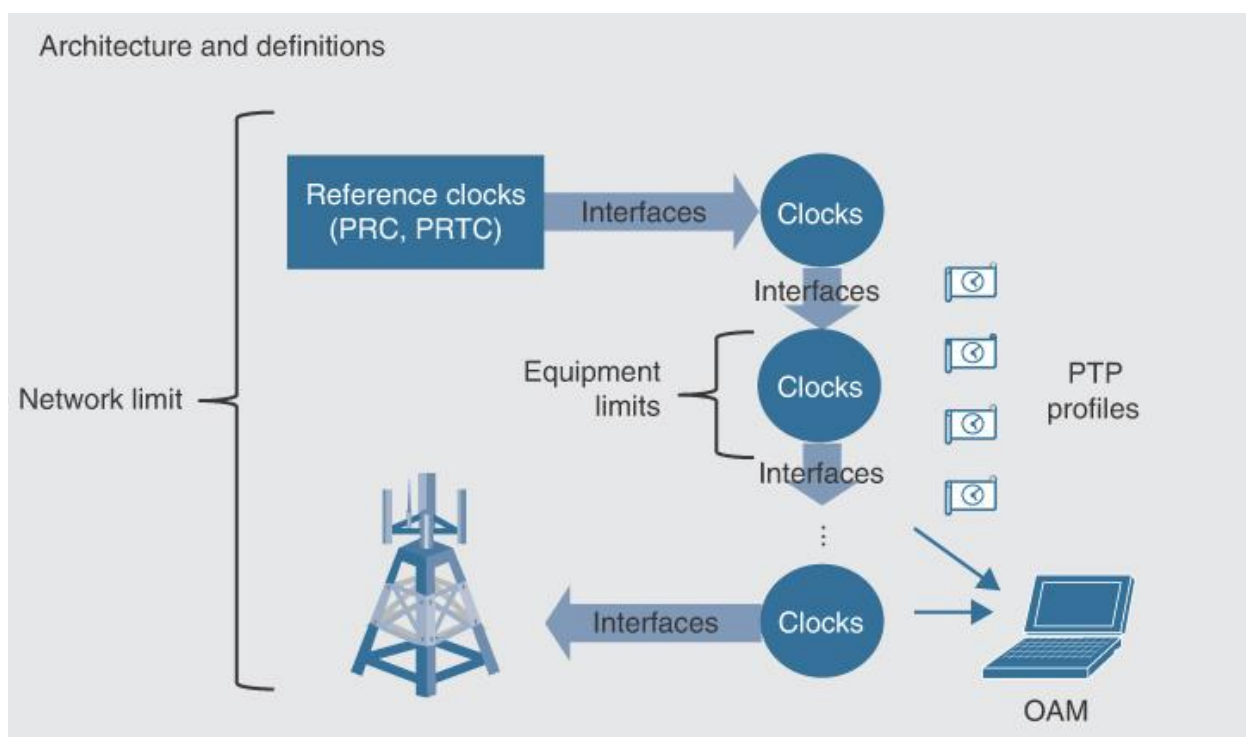


Рис. 4.1. Приклад підтримки різних протоколів синхронізації

У наступному списку докладно описані типи рекомендацій у межах кожної категорії методу синхронізації:

- Функціональні архітектури можуть містити визначення, термінологію та скорочення, а також архітектуру, структуру та вимоги сценарію синхронізації;
- Функції рівня синхронізації містять елементарні функції або функціональні блоки сценарію. Ці рекомендації можуть включати основні логічні схеми та діаграми станів для функцій рівня управління. Багато інженерів вважають, що вони описують аспекти рішення, пов'язані з площиною управління;
- Мережеві обмеження та вимоги до рішень визначають наскрізну продуктивність та вимоги, які мають бути виконані у всій мережі розподілу часу. Ці документи визначають очікувану якість синхронізуючого сигналу, що виходить з кінця тимчасового ланцюжка, і широко моделюються за допомогою складних математичних симуляцій;
- Специфікації та обмеження тактової частоти обладнання визначають робочі характеристики та функціональні вимоги, яким повинен відповідати кожен компонент наскрізного розподілу синхронізації, щоб не порушувати мережеві обмеження. Це включає безліч рекомендацій, які визначають характеристики і продуктивність еталонних годинників, таких як PRTC;
- Профілі зв'язку визначають протокол, потоки повідомлень, поля та значення, а також механізми вибору годинників, які працюватимуть на певному годиннику. Ці профілі визначають точний механізм та повідомлення, що використовуються для передачі частоти, фази та часу.

Існують інші документи та рекомендації, які може бути важче охарактеризувати, наприклад, ті, які визначають електричні характеристики інтерфейсу синхронізації (наприклад, сигнал 10 МГц) або метод, який використовується для забезпечення простежуваності на рівні якості мережі (наприклад, ESMC). Також можуть бути документи, що стосуються певної зв'язаної області, що представляє інтерес сценарію або експлуатаційного аспекту, наприклад ОАМ.

4.1 Рекомендації ITU-T за фізичним часом та часом TDM

Перший розділ рекомендацій, який слід розглянути, стосується передачі частоти за допомогою фізичних методів та методів TDM. Ці рекомендації включають багато хто, які визначають історичні методи частотної синхронізації, хоча ці методи широко використовувалися і досі широко використовуються в старіших базових радіостанціях 2G/3G для мобільних мереж. Вони, як і раніше, актуальні для більш сучасних методів, таких як SyncE, оскільки він був розроблений з тією ж метою, що й існуючі успадковані методи, що прийшли з SDH і SONET.

У першому розділі буде категоризовано різні типи рекомендацій і те, як вони вписуються в загальну картину. У наступних розділах по черзі буде розглянуто кожен категорію та дано короткий виклад рекомендацій, що застосовуються до цієї категорії.

4.2 Типи стандартів для фізичної синхронізації

Рекомендації щодо частотної синхронізації з використанням фізичних методів та методів TDM можна загалом згрупувати у наступні категорії:

- Визначення, архітектура та вимоги: G.781, G.810;
- Комплексне рішення та продуктивність мережі: G.823, G.824, G.825;
- Вузел та тактова частота: G.811, G.811.1, G.812, G.813;
- Інша рекомендація: G.703.

Ці загальні рекомендації є основою всіх наступних рекомендацій з фізичної частоти. Вони містять визначення та термінологію, а також архітектуру та вимоги для розподілу частотної синхронізації з використанням фізичних методів. Це не весь набір, але включає ті, які безпосередньо застосовні до синхронізації фізичних частот.

Функції рівня синхронізації.

ITU-T G.781 визначає набори елементарних функцій, які є частиною того, що він визначає на трьох рівнях: синхронізація, мережа та транспорт. Ці функції описують синхронізацію мережевих елементів SDH, Ethernet та OTN і те, як ці елементи беруть участь у синхронізації мережі. З області рекомендації. [20]

Ця Рекомендація визначає бібліотеку базових будівельних блоків розподілу синхронізації, які називаються «елементарними функціями», та набір правил, за якими вони об'єднуються для опису функціональних можливостей синхронізації обладнання цифрової передачі.

Хоча G.781 - досить великий документ і дещо складний для читача, він дійсно містить досить багато корисної інформації з основних понять. Ця рекомендація розбиває доступні мережеві технології TDM на такі варіанти:

- Варіант I. На основі ієрархії 2048 кбіт/с (наприклад, E1). Він включає виділені схеми синхронізації (без трафіку) 2048 кГц та 2048 кбіт/с;
- Варіант II: на основі ієрархії 1544 кбіт/с, яка включає швидкості 1544 кбіт/с, 6312 кбіт/с та 44 736 кбіт/с (наприклад, T1). Він включає виділені схеми синхронізації (без трафіку) 64 кГц та 1544 кбіт/с;
- Варіант III: на основі ієрархії 1544 кбіт/с, яка включає швидкості 1544 кбіт/с, 6312 кбіт/с, 33064 кбіт/с, 44 736 кбіт/с та 97 728 кбіт/с. Він включає виділені схеми синхронізації (без трафіку) 64 кГц та 6312 кГц.

G.781 включає наступні основні теми, додатки та доповнення основи синхронізації, включаючи огляд інтерфейсів синхронізації, визначення рівнів якості (QL), повідомлення про стан синхронізації (SSM) та типу, довжини, значення (TLV) для різних рівнів якості. Також розглядаються концепції таймерів затримки та очікування відновлення, пріоритетів джерел, автоматичного вибору джерела та запобігання тимчасовим петель.

Атомарна функція різних рівнів синхронізації.

Додаток А, "Процес вибору синхронізації". Це дуже важлива програма, тому що в ньому докладно описується процес вибору тактового генератора найкращого джерела частоти в різних умовах.

Додаток IV, "Взаємодія обладнання варіанта II, що підтримує SSM другого покоління та SSM першого покоління, з використанням функції трансляції".

Додаток VI Роз'яснення використання аббревіатури SEC. У цьому додатку пояснюється використання терміну SEC для позначення тактових імпульсів синхронного обладнання, тактових імпульсів обладнання SDH і його зв'язок з рівнем якості QL-SEC. Про це також йдеться у цьому розділі.

Додаток VII, "Приклади використання змішування SSM та eSSM".

G.781 визначає дуже важливу функцію для підходу до частотної синхронізації, яка визначає процес вибору найкращого доступного джерела частоти (у розділі 5 у поєднанні з Додатком А). [21]

Інший важливий момент у G.781 також стосується нового значення аббревіатури SEC, яке пояснюється у Додатку VI та пункті 3.6. Спочатку термін «SEC» використовувався для позначення годинника обладнання SDH, але тепер цей термін було змінено (приблизно з 2018 р.) на синхронний годинник обладнання. Також є примітка, яка пояснює це, в розділі G.8261 далі в цьому розділі.

Цей новий SEC є загальним терміном, що використовується для позначення всього наступного: годинник обладнання SDH (G.813), годинник обладнання Ethernet (ЕЕС G.8262) і годинник обладнання OTN (ОЕС в G.8262). Однак деякі з старіших рекомендацій, заснованих на TDM (наприклад, G.813), як і раніше, використовують SEC для позначення певного годинника обладнання SDH.

Визначення та термінологія для мереж синхронізації

У цій Рекомендації подано визначення та скорочення, що використовуються у Рекомендаціях з хронування та синхронізації. Він також надає довідкову інформацію про необхідність обмежити зміну фази та погіршення роботи цифрових систем.

Ця рекомендація включає такі основні теми та програму:

- Визначення, що стосуються тактового обладнання, мереж синхронізації, режимів роботи тактового сигналу, характеристик тактового сигналу та деяких специфічних термінів SDH;
- Фазові варіації та спотворення та їх специфікація;
- Вимірювання годинника.

Додаток II, "Визначення та властивості величин стабільності частоти і часу", яке охоплює девіацію Аллана (ADEV), модифіковану ADEV (MDEV), тимчасову девіацію (TDEV), помилку тимчасового інтервалу (TIE) та помилку максимального тимчасового інтервалу (MTIE).

Ця рекомендація є гарним довідковим матеріалом для отримання іншого пояснення загальних термінів та концепцій, що використовуються у синхронізації та таймінгу. Той факт, що його не дуже складно читати (принаймні більшу частину), робить його зручним помічником у процесі навчання.

ITU-T G.811 визначає (тимчасові) характеристики тактових імпульсів PRC як джерел частоти мережі синхронізації. З області рекомендації: У цій Рекомендації викладено вимоги до первинного еталонного годинника (PRC), що підходить для забезпечення синхронізації в цифрових мережах. Ці вимоги застосовуються за умов навколишнього середовища, встановлених для цифрового обладнання. [22]

Ця рекомендація включає такі основні теми:

- Вимоги до точності частоти (1 частина із 10¹¹ за тиждень);
- Генерація шуму (дрейф та джиттер на вихідному інтерфейсі);
- Визначено вихідні інтерфейси.

Незважаючи на те, що початкова рекомендація походить від 1970-х років, останньої версії G.811 «всього» 25 років, хоча у 2016 році було опубліковано поправку. Поправка охоплює деякі зміни для вдосконаленого первинного еталонного годинника (ePRTC) і для інтерфейсів 10 МГц. На щастя, поправка була

опублікована з повним текстом, тому для прочитання повної рекомендації потрібен лише цей єдиний документ.

ITU-T G.811.1 визначає (тимчасові) характеристики розширених тактових генераторів PRC як джерел частоти мережі синхронізації. Частотна точність ePRC у десять разів вища, ніж у PRC. З області рекомендації:

У цій Рекомендації викладаються вимоги до вдосконалених первинних еталонних тактових частот (ePRC), які підходять для частотної синхронізації. Ці вимоги застосовуються за умов навколишнього середовища, зазначених для устаткування.

Ця рекомендація включає такі основні теми:

- Вимоги до точності частоти (1 частина із 1012 за один тиждень);
- Генерація шуму (дрейф та джиттер на виході);
- Визначено вихідні інтерфейси.

G.811.1 - це нещодавня рекомендація, що охоплює нові години ePRC.

ITU-T G.812 описує мінімальні вимоги до пристроїв синхронізації, які використовуються як вузли в мережах синхронізації. Це стосується таких аспектів як відхилення частоти; діапазон втягування, утримання та відриву; генерація, толерантність та передача шуму; перехідні характеристики та характеристики утримання. З області рекомендації. [23]

Функція вузлових годин полягає в тому, щоб вибрати одну із зовнішніх ліній синхронізації, що входять до станції електрозв'язку, як активний опорний сигнал синхронізації, зменшити його тремтіння та дрейф, а потім розподілити посилення на телекомунікаційне обладнання на станції.

Ці тактові імпульси вузла в основному є пристроями синхронізації, які краще, ніж тактові частоти мережевих елементів, і можуть використовуватися в мережі розподілу частот для забезпечення кращої продуктивності (особливо під час утримання, коли з'єднання з PRC не працює). Таким чином, вони краще, ніж мережеві елементи, але не такі гарні, як годинник PRC.

G.812 визначає шість окремих типів годинника:

- Тип I: для використання у мережах, оптимізованих для ієрархії 2048 кбіт/с;
- Тип II: для використання в мережах, оптимізованих для ієрархії 1544 кбіт/с із суворішими вимогами до утримання;
- Тип III: для використання в мережах, оптимізованих для ієрархії 1544 кбіт/с із менш суворими вимогами до утримання – для використання в кінцевих офісах;
- Тип IV: для використання у мережах, оптимізованих для ієрархії 1544 кбіт/с;
- Тип V: годинник транзитних вузлів із версії цієї рекомендації 1988 р. (історичні дані);
- Тип VI: годинник локального вузла з версії цієї рекомендації 1988 (історична);

Ця рекомендація включає такі основні теми, додаток та додаток:

- Точність частоти;
- Діапазони втягування, утримання та вилучення;
- Генерація шуму (заблокований дрейф, неблокований дрейф, джиттер);
- Перешкодостійкість (дрейф та джиттер);
- Передача шуму;
- Короткочасна та довготривала (утримуюча) перехідна характеристика фази;
- Визначення інтерфейсів;
- Додаток А, «Технічні характеристики годинників типів IV, V та VI»;
- Додаток II, "Метод вимірювання передачі шуму".

ITU-T G.813 визначає мінімальні вимоги до тактових сигналів обладнання SDH. З області рекомендації:

Ця Рекомендація містить два варіанти SEC. Перший варіант, званий «Варіант 1», застосовується до мереж SDH, оптимізованих для ієрархії 2048 кбіт/с. Ці мережі допускають еталонний ланцюжок синхронізації найгіршого випадку, як показано на малюнку 8-5 [з] G.803. Другий варіант, званий «Варіант 2», застосовується до мереж SDH, оптимізованих для конкретної ієрархії 1544 кбіт/с, яка включає швидкості 1544 кбіт/с, 6312 кбіт/с та 44 736 кбіт/с.

Ця рекомендація включає такі основні теми та програми:

- Точність частоти для вузлів Варіант 1 та Варіант 2 SEC;
- Діапазони втягування, утримання та вилучення для обох варіантів;
- Генерація шуму, стійкість до шуму та передача шуму;
- Перехідні характеристики та характеристики утримання;
- Додаток I, «Посібник із взаємозв'язку між обмеженнями мережі та допусками вхідного шуму»;
- Додаток II, «Міркування щодо вимог до смуги пропускання, накопичення шуму та дрейфу корисного навантаження»;
- Програми дуже добре читати, якщо тема цікава.

G.823: Управління джиттером та дрейфом у цифрових мережах, заснованих на ієрархії 2048 кбіт/с

ITU-T G.823 охоплює мережеві обмеження на тремтіння та дрейф для мереж трафіку та синхронізації на основі ієрархії 2048 кбіт/с. Електричні характеристики цих інтерфейсів визначені G.703. Зі введення до рекомендації:

Надмірне тремтіння та дрейф можуть негативно вплинути як на цифрові (наприклад, шляхом генерації бітових помилок, прослизання та інших відхилень), так і на аналогові сигнали (наприклад, через небажану фазову модуляцію переданого сигналу).

Отже, необхідно встановити обмеження на максимальну величину джиттера та дрейфу фази, а також відповідний мінімальний допуск джиттера та дрейфу фази на мережевих інтерфейсах, щоб гарантувати належну якість сигналів, що передаються, і належну конструкцію обладнання.

Ця рекомендація включає такі основні теми, додатки та доповнення:

- Мережеві обмеження для інтерфейсів трафіку (вихідний джиттер, вихідний дрейф);
- Мережні обмеження для інтерфейсів синхронізації (джиттер на виході, дрейф на виході) для тактових генераторів різної якості, таких як первинні опорні тактові

імпульси (PRC), блоки живлення синхронізації (SSU), тактові частоти обладнання SDH (SEC) та плезіохронна цифрова ієрархія (PDH));

- Стійкість до джиттера та дрейфу (вхідного) трафіку та інтерфейсів синхронізації;
- Додаток А, "Мережева модель, що лежить в основі обмеження мережі синхронізації";
- Додаток В, «Еталонна модель та параметри дрейфу фази мережі»;
- Додаток І та ІІ: Облік покриття та методи вимірювання дрейфу.

G.823 понад 20 років. Щоб прочитати повну рекомендацію, вам потрібно прочитати лише останню рекомендацію від 2000 року. Оскільки це відноситься до каналів на основі системи 2048 кбіт/с, його цікавлять лише ті регіони, в яких використовуються канали європейського типу, а це більшість місць, крім США, Канади та Японії.

правління джиттером та дрейфом у цифрових мережах, заснованих на ієрархії 1544 кбіт/с

ITU-T G.824 охоплює мережеві обмеження на тремтіння та дрейф для мереж трафіку та синхронізації на основі ієрархії 1544 кбіт/с. Електричні характеристики цих інтерфейсів визначені G.703. Насправді, це версія G.823 T1. З області рекомендації:

Надмірне тремтіння і дрейф можуть негативно вплинути як на цифрові (генерація бітових помилок, неконтрольовані прослизання), так і на аналогові сигнали (небажана фазова модуляція сигналу, що передається). Отже, необхідно встановити межі присутності джиттера і дрейфу на мережевих інтерфейсах, щоб гарантувати належну якість сигналів, що передаються.

Ця рекомендація включає такі основні теми та програму:

- Мережеві обмеження для інтерфейсів трафіку (вихідний джиттер, вихідний дрейф);
- Мережеві обмеження для інтерфейсів синхронізації (вихідний джиттер, вихідний дрейф) для тактових імпульсів PRC та опорних інтерфейсів 1544;

- Стійкість до джиттера та дрейфу для інтерфейсів трафіку (вхід) та годин (вхід);
- Додаток А, «Еталонні моделі та бюджети мандрівок»;

Хоча G.824 більше 20 років, виправлення було опубліковано у 2015 році. Щоб прочитати повну рекомендацію, вам знадобиться обидва документи, доступні за наступним посиланням. Оскільки ця рекомендація застосовується до каналів, заснованих на системі 1544 кбіт/с, вона цікавить лише ті, що використовують канали північноамериканського типу, у тому числі США, Канаду та Японію.

Управління джиттером та дрейфом у цифрових мережах, заснованих на синхронній цифровій ієрархії (SDH)

ITU-T G.825 охоплює мережеві обмеження на тремтіння та дрейф для мереж трафіку та синхронізації на основі ієрархії SDH. Архітектурні аспекти мереж SDH визначені у G.803 з оптичною, електричною та іншою інформацією у численних інших рекомендаціях. З області рекомендації:

Сфера застосування цієї Рекомендації ITU-T полягає в тому, щоб визначити параметри та відповідні значення, які можуть задовільно контролювати величину джиттера та дрейфу сигналу, що є присутнім в інтерфейсах мережа-мережа (NNI) SDH.

Як було зазначено раніше, вимоги до фази тремтіння та дрейфу фази для мереж PDH та синхронізації, засновані на швидкості передачі першого рівня 2048 кбіт/с, визначені в G.823. Мережі, засновані на швидкості передачі першого рівня 1544 кбіт/с, охоплюються G.824. [24]

Ця рекомендація включає такі основні теми та програми:

- Мережеві обмеження для інтерфейсів синхронного транспортного модуля (STM-N) (вихідний джиттер, вихідний дрейф);
- Допуск джиттера та дрейфу вхідних інтерфейсів STM-N;
- Генерація та передача джиттера та дрейфу;
- Додаток I, «Взаємозв'язок між вимогами до джиттера мережного інтерфейсу та допустимим рівнем джиттера на вході»;

- Додаток II, "Методика вимірювання вихідного дрейфу синхронних інтерфейсів";

G.825 також більше 20 років, але у 2001 році була опублікована помилка, а у 2008 році була опублікована поправка. Поправка додала інформацію про інтерфейси STM-256 (40 Гбіт/с), яка може представляти інтерес.

Вузол та тактова частота

Ці рекомендації охоплюють вимоги до синхронізації для ієрархії годинника в мережі розподілу фізичного часу. Мережа будує ієрархію годинника, використовуючи відносини головний-підлеглий між кожним рівнем ієрархії. Кожний годинник синхронізується з вищим рівнем по мережі розподілу синхронізації, причому найвищим рівнем є PRC.

Ієрархічні рівні та пов'язані з ними рекомендації:

PRC у G.811

Ведений годинник (транзитний вузол) в G.812

Ведений годинник (локальний вузол) в G.812

Синхронізація мережного елемента SDH G.813.

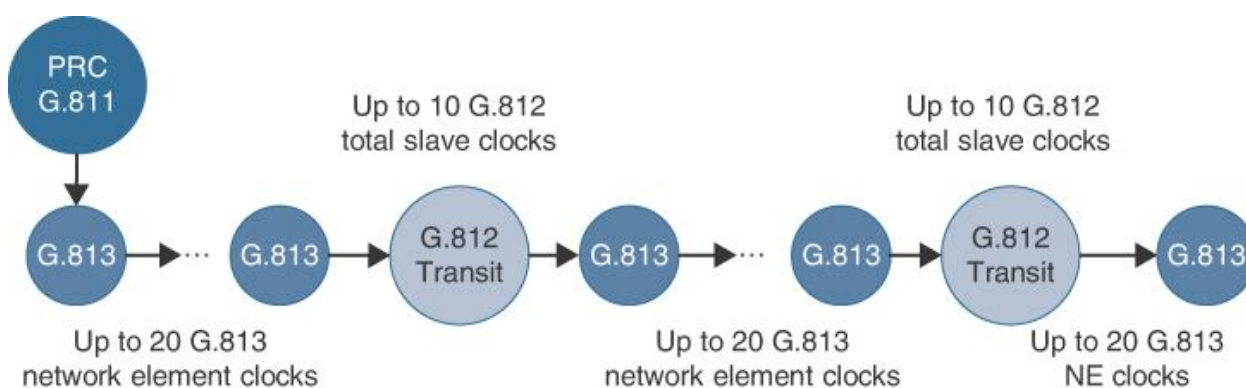


Рис. 4.2. Ієрархія годинників

Подальше обмеження цієї топології полягає в тому, що загальна кількість тактів мережевих елементів SDH в ланцюжку обмежена 60. Це не означає обмеження 60 мережевих елементів, просто обмеження 60 в одному ланцюжку.

4.3 Функції рівня синхронізації для пакетних мереж

G.781.1 визначає модель функціональної архітектури та відповідні елементарні функції для передачі тимчасової та частотної синхронізації за допомогою методів на основі пакетів (з використанням RTP). З області рекомендації:

Функціональна архітектура містить два рівні синхронізації, рівень мережевої синхронізації та рівень розподілу синхронізації. Крім того, деякі елементарні функції, пов'язані з синхронізацією, визначені в цій рекомендації, є частиною рівня транспорту.

Визначення та термінологія для синхронізації в пакетних мережах

ITU-T G.8260 надає визначення, термінологію та скорочення, що використовуються в рекомендаціях щодо хронуння та синхронізації в пакетних мережах. З області рекомендації:

Він включає математичні визначення різних показників стабільності синхронізації та якості для пакетних мереж, а також надає вихідну інформацію про природу систем синхронізації пакетів та погіршення, створювані пакетними мережами. [25]

Ця рекомендація містить визначення численних концепцій, що розглядаються в цій книзі, хоча G.8260 розглядає цю тему дещо математично, ніж тут. Хоча це не дуже довгий документ, він переходить на наступний рівень складності пояснення концепцій. Ця рекомендація включає такі основні теми:

- Визначення термінів, таких як різні форми помилки часу;
- Природа систем синхронізації пакетів, включаючи визначення значимих моментів;
- Відмінності між системами синхронізації на основі пакетів та фізичного рівня;
- Класи тактових імпульсів пакетів, включаючи провідний пристрій пакетів та ведені пристрої пакетів;
- Двосторонні протоколи синхронізації та потік синхронізації від ведучого до веденого;

- Характеристика інтерфейсу обладнання сигналів синхронізації пакетів;

Найбільш важливо, що G.8260 визначає наступні терміни: тактова частота основного пакета, тактова частота пакета ведена і сигнал синхронізації пакета. Існує також додаток, в якому описані такі показники вимірювання пакетів, як MPE та TDEV, а також інформація про фільтрацію та вибір пакетів.

Архітектура та вимоги до пакетної доставки частот.

ITU-T G.8265 описує архітектуру та вимоги до пакетного розподілу частот у телекомунікаційних мережах. У ньому коротко описані приклади пакетного розподілу частот, такі як NTP та RTP. З області рекомендації.

У цій Рекомендації описується загальна архітектура розподілу частот з використанням методів на основі пакетів. Вимоги та архітектура утворюють основу для специфікації інших функцій, необхідних для досягнення пакетного розподілу частот у несучому середовищі. Описана архітектура охоплює випадок, коли взаємодія протоколу відбувається лише в кінцевих точках мережі, між головним годинником пакета і веденим годинником пакета.

Таким чином, ця рекомендація не поширюється на деталі архітектур, у яких пристрої між синхронізаторами провідного та веденого пакетів беруть участь у вирішенні синхронізації. Включено обговорення цих тем:

- Вимоги до синхронізації пакетів;
- Архітектура пакетного розподілу частот, включаючи резервування та поділ мережі;
- Пакетні протоколи для частотного розподілу: RTP та NTP;
- Аспекти безпеки.

Структура фазового та часового годинника

ITU-T G.8273 - це базова рекомендація для фазового та часового годинника, що використовують методи на основі пакетів для передачі часу / фази. Це означає, що він розглядає рекомендації по годинах (серія G.8273.x), але не містить великої кількості інформації про них. З області рекомендації.

Ця Рекомендація являє собою рамкову Рекомендацію для фазового та часового годинника для пристроїв, що використовуються для синхронізації мережевого обладнання, які працюють у мережевій архітектурі, визначеній у [ITU T G.8271], [ITU-T G.8275] та ITU-T G. 8271. .x-серія Рекомендацій. [26]

Ця Рекомендація є основою для фазового та часового годинника, визначеного в серії ITU T G.8273.x. Він включає додатки з докладним описом методів тестування та вимірювання фазових та часових годин.

Ця рекомендація включає наступну основну тему, додатки та доповнення:

- Загальне уявлення про години фази та часу, в якому описані типи годин, охоплені набором рекомендацій G.8273.x;
- Додаток А, «Перевірка та вимірювання годин часу/фази»;
- Додаток В, «Методи вимірювання, пов'язані зі специфікацією обладнання для вимірювання фази/часу»;

Декілька додатків з аспектів тестування тактової частоти.

Додатки та додатки містять докладні відомості про тестування та вимірювання фазових та часових годин, які варто вивчити.

Архітектура та вимоги для пакетного тимчасового та фазового розподілу ITU-T G.8275 описує архітектуру та вимоги до пакетного розподілу часу та фази у телекомунікаційних мережах з використанням RTP. З області рекомендації:

Вимоги та архітектура формують основу для специфікації інших функцій, які необхідні для досягнення пакетного розподілу часу та фази в несучому середовищі. Описана архітектура охоплює випадок, коли взаємодія протоколу відбувається на всіх вузлах, між головним годинником пакета і підпорядкованим годинником пакета або тільки підмножиною вузлів між головним годинником пакета і веденим годинником пакета.

У цій галузі згадується, що кожен вузол між ведучим і веденим годинником братиме участь у «взаємодії протоколу», що в основному означає, що вузли розуміють та обробляють RTP (а не просто перемикають пакети, що містять його). Це ще один спосіб сказати, що кожен вузол повинен бути граничним або прозорим

годинником. Незважаючи на це, якщо ви прочитаєте розділ 7 або Додаток I, ви помітите, що вони охоплюють сценарії, в яких це не так.

Порівнюючи область видимості з G.8265, ви помітите, що вони в основному однакові, за винятком того, що G.8265 призначений для частоти, а G.8275 – для часу та фази. Багато термінів, що використовуються в G.8275, засновані на концепціях, представлених у G.8260 (та G.810).

Ця рекомендація включає такі основні теми, додатки та доповнення:

- Загальне введення та вимоги до пакетного розподілу часу/фази;
- Архітектура пакетного розподілу часу/фази (включаючи резервування);
- Аспекти безпеки;
- Додаток А, «Тимчасові / фазові моделі на основі ІТУ-Т G.805»;
- Додаток В, «Включення віртуального порту РТР в години РТР» (який був перенесений до G.8275 з документів профілю G.8275.x, оскільки це було застосовно до обох профілів; той же підхід був використаний для Додатка С, Додаток D та Додаток VIII);
- Додаток С, "Варіанти установки топології РТР з альтернативним ВМСА";
- Додаток D, «Індикація невизначеності синхронізації (необов'язково)»;
- Додаток I, «Архітектура для розподілу часу та фази по мережі з комутацією пакетів, що забезпечує PTS [часткову підтримку синхронізації] на рівні протоколу» (тобто вузли, які не обробляють РТР);
- Додаток VIII, "Опис режимів синхронізації РТР та пов'язаного вмісту повідомлень Announce";
- Додаток VIII дуже цікаво читати, тому що він описує зв'язок між станом портів годинника, станом годинника в цілому і вмістом повідомлення Announce.

Пункт 7 G.8275, «Архітектура пакетного розподілу часу/фази», охоплює різні випадки проектування мережі з комутацією пакетів та є особливо цікавою для читання. Архітектура описує два випадки, коли:

- Підтримка синхронізації забезпечується всіма вузлами в мережі (наприклад, граничним годинником) у поєднанні з підтримкою частоти фізичного рівня (зазвичай SyncE);
- Проміжні вузли не забезпечують підтримку синхронізації, але підтримка синхронізації забезпечується GNSS на межі мережі, а RTP діє як резервний. Це називається допоміжною частковою підтримкою синхронізації (APTS).

Див. Попередні розділи G.8271.1 та G.8271.2 для детального опису цих двох різних топологій мережі. Нарешті, G.8275 також досліджує різні варіанти розміщення джерел часу та способи вирішення проблем надмірності. Нову версію G.8275 було схвалено на пленарному засіданні в жовтні 2020 року.

Комплексне рішення та продуктивність мережі розглянуті раніше рекомендації щодо часу для пакетів засновані на термінах, визначеннях, вимогах та архітектурі. Вони становлять основу наступної категорії, що відноситься до наскрізної топології мережі, дизайну та продуктивності.

Оскільки ІТУ-Т розробляє набір рекомендацій як загальне рішення для синхронізації, одним із перших завдань є визначення характеристик мережі з комутацією пакетів, яка нестиме синхронізацію. Ці рекомендації також визначають межі продуктивності, яким повинен відповідати сигнал часу, що поширюється через мережу. Ці значення відомі як мережні обмеження та включають бюджет помилок синхронізації для наскрізної мережі.

ІТУ-Т охоплює це для випадку пакетних мереж, що несуть частоту (G.8261 та G.8261.1), а потім для випадку пакетних мереж, що переносять час та фазу (G.8271, G.8271.1 та G.8271.2).

Мережеві обмеження для синхронізації часу в пакетних мережах з повною підтримкою синхронізації з мережі

ІТУ-Т G.8271.1 визначає мережеві обмеження для тимчасової та фазової синхронізації в пакетних мережах з повною підтримкою синхронізації з мережі (або "з повною підтримкою на шляху"). Цей випадок з повною підтримкою по

дорозі прямо еквівалентний рекомендації G.8271.2, яка охоплює випадок без підтримки на дорозі.

Зверніть увагу, що оскільки певна мережа має повну підтримку синхронізації, кожен вузол повинен обробляти RTP, тому мережа реалізована у вигляді топології «крок за кроком». У цьому випадку RTP переноситься за допомогою багатоадресної передачі 2 рівня (Ethernet) і реалізується відповідно до профілю електрозв'язку G.8275.1. [27]

Ця рекомендація визначає ті обмеження, які застосовуються до мережної моделі пакетного розподілу, описаної в G.8271. Охоплювані тут обмеження - це максимальна тимчасова та фазова помилка, що генерується в мережі, а також мінімальна фазова та тимчасова помилка, яку обладнання має витримувати. З області рекомендації:

У цій Рекомендації вказані максимальні мережеві межі фазової та тимчасової помилки, які не повинні перевищуватись. Він визначає мінімальну стійкість обладнання до фазової та тимчасової помилки, яка має бути забезпечена на межі пакетних мереж на інтерфейсах фазової та тимчасової синхронізації. У ньому також викладено мінімальні вимоги до функції синхронізації мережевих елементів.

У цій Рекомендації розглядається випадок розподілу часу та фази мережі з використанням пакетного методу з повною підтримкою синхронізації (FTS) на рівні протоколу з мережі.

У G.8271.1 розглядаються два випадки розгортання: один, коли ведений годинник вбудований в кінцевий додаток (що для мобільних пристроїв означає, що радіостанція має ведений годинник RTP), і другий, коли ведений годинник є зовнішнім по відношенню до кінцевого додатку. У цьому другому випадку сигнал часу передається в кінцеву програму будь-яким іншим способом (прикладом може бути сигнал синхронізації, такий як 1PPS, перенесення фази).

Для кожного з цих двох варіантів розгортання стандарт визначає обмеження у різних точках А, В, С, D та Е. Точка D прихована у разі розгортання 1, оскільки вона вбудована в кінцевий додаток. На рис. 4.3 показаний варіант розгортання з невбудованим годинником.

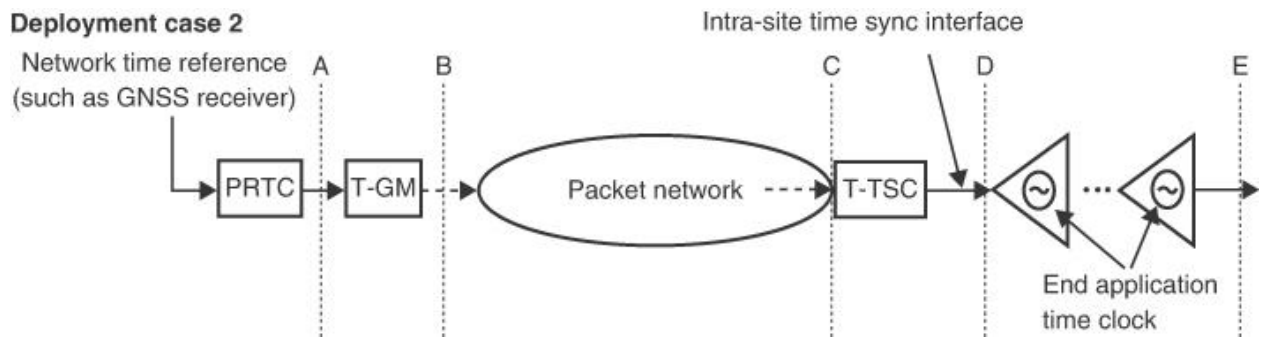


Рис. 4.3. Розгортання з невбудованим годинником.

Ця рекомендація включає наступну основну тему та програми:

- Мережеві обмеження у різних точках мережі від А до Е;
- Додаток I, «Моделі тактових імпульсів для моделювання накопичення шуму» (моделі накопичення шуму для T-BC та T-TC);
- Додаток II, "Гіпотетичні еталонні моделі, що використовуються для визначення обмежень мережі";
- Додаток III, "Рекомендації з обмеження мережі" (як виміряти обмеження мережі у вбудованому веденому випадку);
- Додаток V, "Приклад варіантів проектування" (включає бюджетування TE та сценарії відмови);
- Додаток VII, «Максимальна відносна похибка часу» (охоплює різницю між абсолютною похибкою часу та відносною похибкою часу, причому на малюнку 4.3 показано різницю; дуже важлива концепція для інженерів, які використовують час на передньому етапі);
- Додатки VIII, "Моделі бюджетування в мережі мікрохвильових пристроїв";
- Додаток IX, «Моделі бюджетування в ланцюжку пристроїв xPON або xDSL»;
- Додаток XII, "Приклади варіантів дизайну для фронтального з'єднання та кластерів базових станцій";

G.8271.1 є однією з найважливіших рекомендацій, оскільки визначає поведінку наскрізної мережі, яка використовується для передачі синхронізації на основі пакетів. Це "найкраща у своєму класі" модель для розгортання пакетного

транспортування часу. Він включає безліч докладної інформації про більш детальні проектні рішення для мережі тимчасової синхронізації.

Мережеві обмеження для синхронізації часу в пакетних мережах із частковою підтримкою синхронізації для мережі

ITU-T G.8271.2 визначає мережеві обмеження для тимчасової та фазової синхронізації в пакетних мережах з частковою підтримкою синхронізації з мережі (або без повної підтримки на шляху). Цей випадок часткової підтримки по дорозі прямо еквівалентний рекомендації G.8271.1, яка охоплює випадок з повною підтримкою по дорозі.

Ця рекомендація охоплює два варіанти використання з частковою підтримкою:

- Підтримка часткової синхронізації за допомогою (APTS), де RTP використовується як резервне джерело синхронізації для локального первинного джерела GNSS. Ця резервна копія призначена лише для використання у разі локального відключення GNSS та протягом обмеженого періоду часу (зазвичай 72 години);
- Часткова підтримка синхронізації (PTS) з мережі, де RTP (переноситься по транспортній мережі) є основним джерелом синхронізації, але елементи в мережі не обробляють RTP, щоб зменшити тимчасову помилку.

У цій Рекомендації розглядається розподіл часу і фази мережі з використанням методу на основі пакетів з частковою підтримкою синхронізації на рівні протоколу з мережі. Зокрема, це стосується архітектур допоміжної підтримки часткової синхронізації (APTS) та підтримки часткової синхронізації (PTS), описаних у [ITU-T G.8275], та профілю протоколу точного часу (RTP), визначеного в [ITU-T G. 8275.2]].

Зверніть увагу, що оскільки мережа має лише часткову підтримку синхронізації, RTP повинен передаватися по IP (IPv4 або IPv6) і, отже, тісно пов'язаний з профілем зв'язку G.8275.2, який використовує RTP через IP (RTPoIP).

Ця рекомендація охоплює три нових типи годин RTP:

- Граничний годинник для телекомунікацій T-BC-P з частковою підтримкою;

- Ведений годинник T-TSC-A Telecom з частковою підтримкою;
- Підлеглий годинник T-TSC-P Telecom з частковою підтримкою;

Годинник -P є граничним і підлеглим годинником, вбудованим у мережу з підтримкою синхронізації PTP, доступною тільки з підмножини мережевих елементів. T-TSC-A – це ведений годинник PTP, яким допомагає прив'язка місцевого часу (зазвичай приймач GNSS) у тій же частково відомій топології. На рис. 4.4 показано топологію мережі, що закінчується на T-TSC-A.

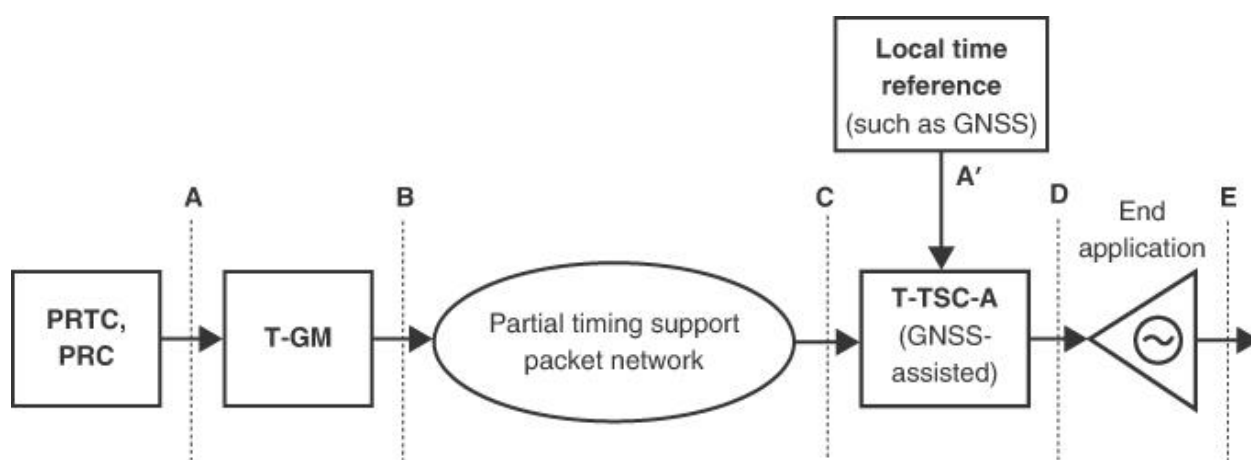


Рис. 4.4. Топологію мережі, що закінчується на T-TSC-A

Ця рекомендація включає наступну основну тему та програми:

- Мережеві обмеження в різних точках мережі від A і від A до E;
- Додаток I, "Сценарії розгортання для мереж з частковою підтримкою синхронізації";
- Додаток II, «Меркування з обробки трафіку протоколу точного часу в мережах з частковою підтримкою синхронізації» (оскільки в мережевих елементах немає підтримки PTP, інженери повинні дуже ретельно спроектувати мережу, щоб мінімізувати джерела помилок часу);
- Додаток III, "Використання частоти для підтримання точного часу";
- Додаток IV, "Модель накопичення шуму в частково обізнаних мережах";

G.8271.2 також є дуже важливою рекомендацією, оскільки він застосовується до тих ситуацій, коли оператор не може забезпечити повну підтримку синхронізації у мережі. [28]

Тимчасові характеристики тактових генераторів пакетного обладнання

У Рекомендації МСЕ-Т G.8263 викладено мінімальні вимоги до функцій синхронізації веденого пристрою з комутацією пакетів (PEC-S, G.8265), коли синхронізація здійснюється від майстра синхронізації з обладнанням з пакетною передачею (PEC-M, G.8266)). Він має справу з пакетною передачею частотної синхронізації, а не будь-яким фізичним методом. З області рекомендації:

У цій Рекомендації основна увага приділяється мобільним додаткам і, зокрема, забезпеченню частотної синхронізації для кінцевих програм, таких як мобільні базові станції. Він підтримує архітектуру, визначену у [ITU-T G.8265]. Інші програми підлягають подальшому вивченню.

Ця Рекомендація включає точність тактової частоти, стійкість до шуму варіації затримки пакета (PDV), характеристики утримання і генерацію шуму. Тактові генератори G.8263 зазвичай розгортаються в типах мереж, визначених G.8261.1, і передаються з використанням профілів RTP G.8265.1. На рис. 4.5 показаний спрощений вигляд одного з варіантів розгортання.

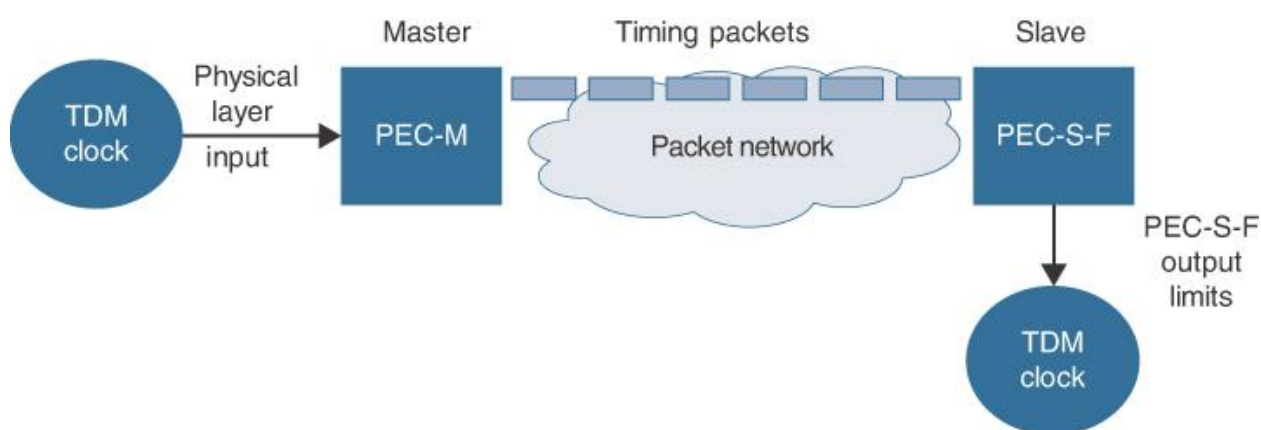


Рис. 4.5. Спрощений вигляд розгортання

Вхід PEC-M з'єднаний із виходом тактової частоти фізичного рівня (SEC, SSU, PRC). Майстер генерує пакети із цього джерела частоти та відправляє їх на

тактову частоту веденого обладнання на основі пакетів (PEC-S-F), яка відновлює частоту.

G.8263 визначає застосовні обмеження у всіх точках цієї мережі. Ця рекомендація включає такі основні теми:

- Гіпотетичні еталонні моделі;
- Контрольні точки для мережних обмежень у пакетних мережах;
- Обмеження мережі PEC-M;
- Обмеження мережі PEC-S-F;
- Обмеження мережі PDV.

G.8266: Тимчасові характеристики тактових генераторів електрозв'язку для синхронізації частоти

У Рекомендації MCE-T G.8266 викладено мінімальні вимоги до функцій синхронізації основного тактового сигналу обладнання на основі пакетів (PEC-M), коли синхронізація виконується від джерела фізичної частоти, що відстежується до PRC/PRS або PRTC. Він має справу з пакетною передачею частотної синхронізації, а не будь-яким фізичним методом. [29]

У цій Рекомендації визначено мінімальні вимоги до функцій синхронізації тактових генераторів електрозв'язку, які працюють у мережевій архітектурі, як визначено в [ITU-T G.8265], та відповідному профілі, визначеному в [ITU-T G.8265.1]. Він підтримує розподіл частотної синхронізації під час використання методів на основі пакетів.

Ця рекомендація включає стандартні метрики точності тактових імпульсів, завадостійкості, передачі шуму, генерації шуму та утримання тактових генераторів T-GM при використанні для частотної синхронізації. По суті, це пакетна версія G.812 (G.8262 для інтерфейсів Ethernet) з багатьма з тих самих обмежень залежно від того, чи є годинник типом I, II або III.

G.8266 визначає застосовні межі частоти PEC-M. Ця рекомендація включає такі основні теми, додаток та додаток:

- Точність частоти;

- Діапазони втягування, утримання та вилучення;
- Генерація шуму (дрейф та джиттер);
- Шумостійкість та передача;
- Перехідні характеристики та характеристики утримання;
- Додаток А, «Функціональна модель тактових генераторів електров'язку» (включає функціональну модель для T-GM/PEC-M);
- Додаток І, "Метод вимірювання передачі дрейфу фази".

4.4 Можливі зміни у рекомендаціях у майбутньому

За останні кілька років у процесі стандартизації синхронізації відбулися разючі зміни. Це в основному обумовлено інноваціями, що походять від 5G та індустрії мобільних телекомунікацій. Передбачити, в якому напрямку можуть розвиватися стандарти, - ризикована справа, але деякі зміни є очевидними.

Можливо, найімовірніша зміна рекомендацій Q13/15 відбудеться через публікацію нової редакції IEEE 1588-2019 з v2.1 протоколу PTP. Відповідно до пункту 19 IEEE 1588-2019, PTP v2.1 розроблено для взаємодії з поточним PTP v2.0. Звичайно, незабаром оператори почнуть розгортати вузли з підтримкою PTP, які підтримують елементи та функції з PTP v2.1. Якщо ці годинники не використовують будь-які функції, представлені в v2.1, вони повинні бути сумісні з існуючими розгортаннями, що використовують v2.0.

Однак у якийсь момент рекомендації ITU-T повинні будуть узгоджуватись з новою версією та розпочати впровадження деяких розширених функціональних можливостей, доступних у новій редакції стандарту IEEE 1588 2019 року. Прикладом цього можуть бути елементи безпеки, представлені в новій редакції PTP.

Також продовжуватиметься робота над деталями та результатами математичного моделювання, які підтримують G.8271.1, G.8273.2 та G.8273.3. Також вже ведеться робота щодо визначення відносної помилки часу (rTE) між

портами граничних годин (в оновленнях G.8273.2). Це обмежує кількість помилок часу, що виникають між різними інтерфейсними портами на мережному елементі або між виходами RTP і 1PPS. [30]

Єдина інша зміна, яка виглядає ймовірною, буде полягати в подальшому прийнятті нових мережевих топологій і обмежень (G.8271.1) для конкретної підтримки випадку проміжного з'єднання в RAN з використанням мережі високоточних граничних годин класу С Т-ВС. Також вживаються постійні зусилля щодо підтримки концепції кластерної синхронізації в мережах 5G RAN (див. Додаток XII до G.8271.1, щоб зрозуміти, як це виглядає).

Більшість цього прийняття для Fronthaul є наслідком еволюції 5G у RAN, а також галузевих ініціатив зі стандартизації у сегменті радіозв'язку мобільної мережі (наприклад, O-RAN Alliance). розділ 4 для отримання додаткової інформації про зусилля зі стандартизації переднього плану.

ВИСНОВКИ

Правильна мережева синхронізація є причиною відмінної продуктивності радіомережі. Деякі з найбільш переконливих варіантів використання 5G, включаючи промислову автоматизацію, залежать від більш точного часу і, ймовірно, найближчим часом викличуть додаткові вимоги до синхронізації. Хоча рівень необхідної точності синхронізації залежить від кількох факторів, було б помилкою застосовувати жорсткі вимоги до синхронізації як загальну вимогу 5G, оскільки це зробило б витрати на 5G та майбутній розвиток мобільних технологій нестійкими. Найжорсткіші вимоги слід розглядати на місцевому рівні лише тоді, де це необхідно.

Ефективне рішення синхронізації, яке враховує всі відповідні сценарії, вимагає підтримки набору інструментів методів синхронізації, реалізованих у домені RAN (GNSS та OAS), транспортному домені (наприклад, RTP) або обох. Для багатьох функцій найважливішим є відносна помилка часу між сусідніми базовими станціями. У цьому контексті бездротова синхронізація (OAS) є потужним інструментом.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Synchronizing 5G Mobile Networks By Dennis Hagarty, Shahid Ajmeri, Anshul Tanwar Published Jun 18, 2021 by Cisco Press.
2. K. Arai та M. Murakami, “Overview of Network Synchronization Technology Standardization in ITU-T,” NTT Technical Review, Vol. 14, No. 2, 2016 року.
3. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3204>
4. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3219>
5. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3144>
6. <https://standards.ieee.org/standard/1588-2019.html>
7. Ericsson Technology Review, Critical IoT connectivity: Ideal for time-critical communications, June 2, 2020, Alriksson, F; Boström, L; Sachs, J; Wang, Y.-P. E; Zaidi, Ali
8. Ericsson Technology Review, 5G-TSN integration meets networking requirements for industrial automation, August 27, 2019, Farkas, J; Varga, B; Мікрос, G; Sachs, J
9. ITU Technical Report TP-GSTR-GNSS – ПОНЯТТЯ ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ GNSS ЯК ПЕРШОРЯДНИЙ ЧАС ПОВІДОМЛЕНЬ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ, 2020
10. ITU-T Recommendations G.826x і G.827x series (G.8200-G.8299): Synchronization, quality and availability targets
11. <https://www.calnexsol.com/en/docman/techlib/timing-and-sync-lab/137-managing-the-impact-of-cable-delays/file>
12. <https://info.calnexsol.com/acton/attachment/28343/f-c92c1cbe-20a7-4b32-b238-0116abcb7bd7/1/-/-/-/-/CX5001%20G.8262%20SyncE%20conformance%20testing%20app%20note%20v6.1.pdf>

13. https://info.calnexsol.com/acton/attachment/28343/f-66bffe95-9a26-4955-9c64-2b3bbc953b7b/1/-/-/-/-/CX3010_G.8262.1_G.8262%20EECs%20Conformance%20Test.pdf
14. https://info.calnexsol.com/acton/attachment/28343/f-75fc9b8f-6884-4c7e-bfa8-0f108a5cea0a/1/-/-/-/-/CX3009_G.8273.2%20BC%20Conformance%20Test.pdf
15. https://info.calnexsol.com/acton/attachment/28343/f-7d718c02-16a1-4899-9ad9-584e6a8243f3/1/-/-/-/-/CX3008_G.8273.2%20T-TSC%20Conformance%20Test.pdf
16. <https://info.calnexsol.com/acton/attachment/28343/f-305478ee-b527-46d6-a20a-b57f34882104/1/-/-/-/-/Measuring%20TE%20Transfer%20of%20T-BCs.pdf>
17. https://info.calnexsol.com/acton/attachment/28343/f-16531778-3816-4524-9834-586a8616ea17/1/-/-/-/-/CX5008_G.8273.2%20Conformance%20Tests.pdf
18. <https://info.calnexsol.com/acton/attachment/28343/f-9be6a7a2-b3c0-49f8-99ea-37db1403ba3c/1/-/-/-/-/CX5020%20G.8273.2%20T-TSC%20Conformance%20Test%20Application%20Note.pdf>
19. <https://standards.ieee.org/products-services/icap/index.html>
20. <https://standards.ieee.org/standard/1588-2008.html>
21. <https://standards.ieee.org/standard/1588-2019.html>
22. <https://handle.itu.int/11.1002/1000/12788>
23. <https://handle.itu.int/11.1002/1000/14240>
24. <https://handle.itu.int/11.1002/1000/13301>
25. <https://handle.itu.int/11.1002/1000/7335>
26. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.824/en>
27. <https://handle.itu.int/11.1002/1000/14206>
28. <https://handle.itu.int/11.1002/1000/13320>
29. <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200L.pdf>
30. <https://tools.ietf.org/html/rfc8173>