ЛЕКЦІЯ 7

Агрегування послідовних каналів WAN

протокол Multilink PPP (MLPPP, MP, RFC 1990)

Навчальна дисципліна

«Глобальні мережі»

Державний університет «Житомирська політехніка»
Кафедра комп'ютерної інженерії та кібербезпеки · 2026

Що було й що буде сьогодні

Пригадуємо ключове з лекцій 5-6 та плануємо лекцію 7

← Лекції 5-6: що знаємо

- Виділені канали WAN: T1/E1, DTE/DCE
- HDLC (ISO 13239) + Cisco HDLC (Type)
- PPP (RFC 1661): LCP + NCP + auth
- PAP vs CHAP (RFC 1994)
- QoS-метрики: bandwidth, delay, jitter
- LLQ, WRED, shaping для голосу

Лекція 7: що вивчимо →

1. Мотивація: чому один канал — мало
2. MLPPP — концепція та RFC 1990
3. Архітектура: Bundle, Member Links
4. Фрагментація й реасемблювання
5. MRRU + Sequence Number
6. Балансування навантаження
7. LFI для чутливого трафіку
8. Налаштування у Cisco IOS
9. MLPPP + CHAP, MLPPP vs EtherChannel

Проблема: одного каналу WAN мало

Реальний сценарій оператора або корпоративного клієнта



Потрібно більше смуги

Один E1 = 2 Мбіт/с. Клієнту потрібно 6 Мбіт/с. Оренда каналу E3 (34 Мбіт/с) — переплата в 5 разів.

→ агрегувати 3 × E1



Обмеження фізики

Наступний рівень (T3/E3) — інший тип обладнання, дорогі CSU/DSU, інші кабелі. Може бути технічно неможливим.

→ додати ще один T1/E1



Потрібна відмовостійкість

Один канал = єдина точка відмови. При обриві волокна — повний простій, поки провайдер не відновить.

→ 2 канали, різні маршрути

Ключова ідея агрегації каналів WAN

Об'єднати **N фізичних каналів** в **один логічний** з пропускною здатністю **~ N × швидкість одного,** автоматичною відмовостійкістю та єдиною IP-адресою.

MLPPP — Multilink PPP

Стандартизоване розширення PPP для агрегації каналів · RFC 1990 (K. Sklower et al., 1996)

Що таке MLPPP

Розширення PPP, яке дозволяє об'єднати **кілька фізичних PPP-каналів** в один **логічний канал (bundle)** з підвищеною пропускною здатністю.

Історія:

- 1994 — RFC 1717 (перша версія)
- 1996 — **RFC 1990** (поточний стандарт)
- 1999 — RFC 2686 (класи обслуговування)
- 1999 — RFC 2686 / 2687 — LFI

Альтернативні назви: *MP · MLP · Multilink PPP*

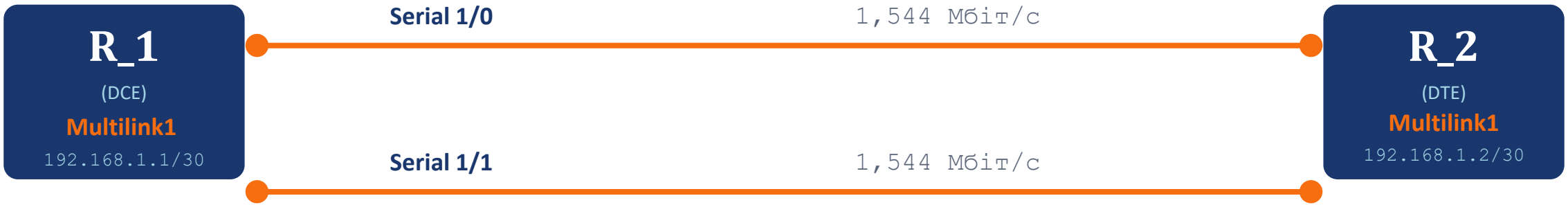
Що дає MLPPP

1. **Збільшена смуга**
   N × швидкість одного каналу мінус overhead ~ 3-5%
2. **Відмовостійкість**
   при обриві одного каналу — трафік іде через решту, автоматично
3. **Єдина IP-адреса**
   маршрутизація бачить один інтерфейс Multilink X
4. **Балансування**
   трафік розподіляється між каналами; можлива фрагментація
5. **Пакетна впорядкованість**
   MLPPP гарантує порядок доставки — важливо для TCP

Архітектура MLPPP: Bundle та Member Links

Один логічний Multilink-інтерфейс поверх N фізичних Serial-інтерфейсів

MLPPP Bundle = N фізичних каналів → 1 логічний Multilink1



Bundle (пучок)

Логічний Multilink-інтерфейс. Має IP-адресу, MTU, конфігурацію CHAP. Маршрутизація бачить лише його.

Member Links

Фізичні Serial-інтерфейси, включені в bundle. Не мають власних IP. Виконують лише передачу фрагментів.

Ефективна смуга

2 × T1 (1,544 Мбіт/с) = ~ 3 Мбіт/с. Overhead MLPPP ~ 3-5% через додаткові заголовки.

Фрагментація і MLPPP-заголовок

Як MLPPP «розрізає» великі пакети та зберігає порядок доставки

Приклад: IP-пакет 1500 байтів через 3 канали

IP-пакет 1500 байтів

→ *фрагментація на 3 частини* →

Frag 1 500 Б	Frag 2 500 Б	Frag 3 500 Б

```
Serial 1/0  →  Frag 1
Serial 1/1  →  Frag 2
Serial 1/2  →  Frag 3
```

На іншому боці: реасемблювання → знову IP-пакет 1500 Б

Структура MLPPP-фрагмента (payload)

B	E	0	Sequence #	Fragment
Begin (1 біт)	End (1 біт)	reserved (2 біти)	24 біт (long) 12 біт (short)	фрагмент даних PPP

→ *B/E маркують початок і кінець оригінального пакета; Sequence # дозволяє реасемблювати у правильному порядку*

MRRU та Sequence Number — параметри MLPPP

Ключові параметри LCP-узгодження, що визначають роботу bundle

MRRU · Maximum Receive Reconstructed Unit

Максимальний розмір реасембльованого пакета

Що це:

MRRU — це аналог MTU для MLPPP-bundle. Визначає найбільший пакет, який bundle може **прийняти й зібрати** після реасемблювання фрагментів.

Типові значення:

- **1500** байтів · за замовчуванням (Ethernet MTU)
- **1524** байтів · Cisco за замовчуванням
- Може досягати **9180** для jumbo frames

Узгодження:

MRRU узгоджується під час фази LCP через опцію *Multilink-MRRU (option 17).* Обидві сторони обирають меншу з двох.

Sequence Number · порядковий номер

Забезпечує впорядкування фрагментів на приймачі

Два формати:

- **Long Sequence Number** — 24 біти

= $2^{24} \approx 16{,}7$ млн номерів
= використовується за замовчуванням

- **Short Sequence Number** — 12 біт

= $2^{12} = 4096$ номерів
= для економії пропускної здатності

Навіщо потрібен:

- Реасемблювання фрагментів у правильному порядку
- Виявлення пропущених фрагментів
- Boundary detection (з B/E бітами)

Балансування навантаження в MLPPP

Два режими: пер-пакетне або пер-фрагментне розподілення

Per-packet Load Balancing

Round-robin розподіл цілих пакетів між каналами

Принцип:

Пакет 1 → канал A, пакет 2 → канал B, пакет 3 → канал C, пакет 4 → канал A…

✓ **Плюси:**

- простий, без фрагментації
- менший CPU-навантаження
- менший MLPPP-overhead

✗ **Мінуси:**

- Немає паралельної передачі одного пакета — швидкість обмежена одним каналом
- Ризик переупорядкування пакетів (out-of-order delivery)

Per-fragment Load Balancing

Кожен пакет ділиться на фрагменти, розкидається по каналах

Принцип:

Пакет 1500 Б → фраг1 → канал A, фраг2 → канал B, фраг3 → канал C — паралельно

✓ **Плюси:**

- Паралельна передача — швидкість реально N × одного
- Порядок гарантований Sequence #
- Оптимально для великих пакетів

✗ **Мінуси:**

- Вищий CPU-overhead (фрагментація + реасемблювання)
- Додатковий MLPPP-заголовок на кожен фрагмент
- При різних затримках каналів — waiting-затримка на реасемблюванні

LFI — Link Fragmentation and Interleaving

Розширення MLPPP для VoIP на повільних каналах · RFC 2686 / 2687

⚠ Проблема на повільному каналі

Канал **128 кбіт/с**· пакет **1500 байтів** = час серіалізації **~ 94 мс**

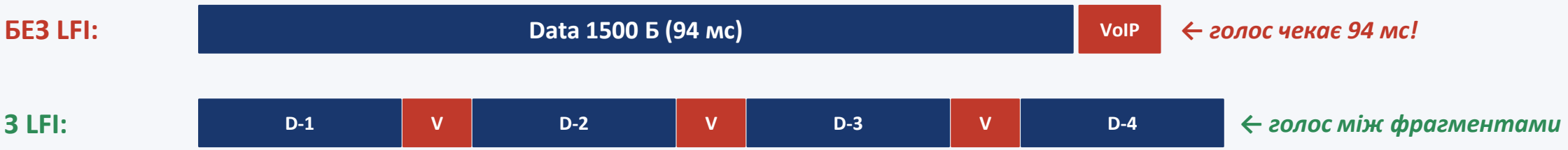
Тобто якщо саме зараз передається великий пакет — VoIP-пакет **чекає ~ 94 мс!** Це перевищує допустимий джитер (30 мс) у 3 рази — якість голосу катастрофічно падає.

☑ Рішення LFI

1. Fragmentation: великі пакети РІЖУТЬСЯ на маленькі шматки (наприклад, по 10-20 мс)

2. Interleaving: між фрагментами великих пакетів ***«вставляються»*** VoIP-пакети — без очікування завершення передачі великого пакета

Візуалізація: пакетний потік на каналі



★ *LFI критично важливий для VoIP на каналах < 768 кбіт/с. Cisco рекомендує фрагменти по 10-20 мс.*

Налаштування MLPPP у Cisco IOS: покроково

6 кроків для створення Multilink-bundle з 2 фізичних каналів

6 обов'язкових кроків

1. Створити віртуальний Multilink-інтерфейс
   `interface Multilink 1`
2. Призначити IP-адресу на Multilink
   `ip address 192.168.1.1 255.255.255.252`
3. Увімкнути multilink на Multilink-інтерфейсі
   `ppp multilink`
   `ppp multilink group 1`
4. На кожному фізичному Serial: encap PPP
   `encapsulation ppp`
5. На фізичних Serial: включити в групу
   `ppp multilink`
   `ppp multilink group 1`
6. no shutdown на всіх інтерфейсах
   `no shutdown`

R_1: bundle з 2 каналів Serial

```
R_1(config)#
  interface Multilink 1
  ip address 192.168.1.1 255.255.255.252
  ppp multilink
  ppp multilink group 1
  exit

  interface Serial 1/0
  clock rate 64000
  encapsulation ppp
  ppp multilink
  ppp multilink group 1
  no shutdown

  interface Serial 1/1
  clock rate 64000
  encapsulation ppp
  ppp multilink
  ppp multilink group 1
  no shutdown
```

Моніторинг та діагностика MLPPP

Команди для перевірки стану bundle та member links

Команда	Призначення
`show ppp multilink`	загальна інформація про всі MLPPP-bundle
`show ppp multilink active`	лише активні bundle
`show ppp multilink interface Multilink 1`	детальна інформація про конкретний bundle
`show interface Multilink 1`	стан логічного інтерфейсу, IP, MTU, статистика
`show interface Serial 1/0`	стан члена bundle — має показувати LCP Open
`debug ppp multilink events`	трасування подій MLPPP (додавання/видалення каналу)
`debug ppp multilink fragments`	детальне трасування фрагментації

Приклад виводу R_1# show ppp multilink :

```
Multilink1, bundle name is R_2
  Endpoint discriminator is R_2
  Bundle up for 00:03:24, total bandwidth 128, load 1/255
  Member links: 2 active, 0 inactive (max 255, min not set)
    Serial1/0, since 00:03:24, no idle timeout
    Serial1/1, since 00:03:21, no idle timeout
```

MLPPP + автентифікація CHAP

Автентифікація виконується на кожному member link окремо; ідентифікатор bundle бере з CHAP-імені

Як працює автентифікація в MLPPP

1. На кожному фізичному Serial-інтерфейсі окремо виконується CHAP-обмін під час LCP

2. MLPPP використовує **CHAP-ім'я** сусіда як ідентифікатор bundle — тобто ВСІ канали, що прийшли від того самого username, автоматично додаються в один bundle

3. Якщо CHAP не пройшов на якомусь каналі — цей канал НЕ додається в bundle. Але bundle продовжує працювати з успішно автентифікованими каналами

4. Endpoint Discriminator (RFC 1990) — додатковий механізм ідентифікації bundle; за замовчуванням = hostname пристрою

R_1: MLPPP + CHAP

```
R_1(config)#
  username R_2 password mypass                ← ім'я сусіда
  interface Multilink 1
  ip address 192.168.1.1 /30
  ppp multilink
  ppp multilink group 1
  ppp authentication chap                     ← CHAP на bundle
  exit

  interface Serial 1/0
  encapsulation ppp
  ppp multilink
  ppp multilink group 1
  ppp authentication chap                     ← CHAP на каналі
  no shutdown
```

MLPPP vs EtherChannel vs ECMP

Різні технології агрегації каналів для різних середовищ

Критерій	MLPPP	EtherChannel (LACP)	ECMP (L3)
Стандарт	RFC 1990	IEEE 802.1AX	OSPF/EIGRP/BGP
Рівень OSI	L2 (канальний)	L2 (канальний)	L3 (мережевий)
Середовище	WAN (serial/PPP)	LAN (Ethernet)	будь-яке з IP
К-сть каналів	необмежено (реально до 10)	до 8 активних + 8 резерв	необмежено
Фрагментація пакетів	так (per-fragment)	ні (per-packet тільки)	ні
Гарантія порядку	так (Sequence #)	так (в межах flow)	ні (може перупорядкувати)
Балансування	per-packet / per-fragment	хеш flow	per-flow (hash-based)
Автентифікація	CHAP/PAP	LACP-hello	OSPF/BGP auth
Типове використання	T1/E1 bundling	серверна ферма LAN	WAN з BGP-провайдером

→ **Правило:** *WAN (Serial, PPP) → MLPPP · LAN (Ethernet) → EtherChannel · L3 з BGP/OSPF → ECMP*

Типові проблеми MLPPP та їх діагностика

Найпоширеніші помилки при налаштуванні та як їх виправити

⚠ Bundle не піднімається

Multilink1 у стані down. Member links працюють як окремі PPP-канали.

Причина: На фізичних інтерфейсах не вказано ppp multilink group N або encapsulation не ppp

Рішення: Перевірити: encapsulation ppp + ppp multilink group X на кожному Serial

⚠ Тільки один канал в bundle

Bundle працює, але member links = 1. Смуга не збільшена.

Причина: Різні номери groups на різних боках; або hostname/CHAP username не збігаються

Рішення: Перевірити ідентичність ppp multilink group N; перевірити username X

⚠ Пакети переупорядковуються

TCP-throughput нижчий за очікуваний; ping показує inconsistent RTT.

Причина: Канали в bundle мають різну затримку/швидкість (нерівнозначні)

Рішення: Використовувати канали з однаковими характеристиками; або вимкнути фрагментацію

⚠ VoIP-затримка занадто велика

Голос переривається, echo, погана якість на повільних каналах.

Причина: Serialisation delay великих пакетів блокує голосові пакети

Рішення: Увімкнути LFI: ppp multilink interleave + ppp multilink fragment delay 10

Практичний сценарій: агрегація 2 × T1 з VoIP

Реальна задача: філія потребує 3 Мбіт/с з підтримкою голосу

Умова задачі

Мережа філії потребує:

- ~ 3 Мбіт/с смуги (для даних + голосу)
- **Підтримка VoIP** (20 одночасних викликів)
- **Відмовостійкість** — недопустимий повний простій

Доступно від оператора:

- T1 (1,544 Мбіт/с) — 300 USD/міс
- T3 (45 Мбіт/с) — 3000 USD/міс

Рішення:

→ **2 × T1 у MLPPP-bundle:**
= **~ 3 Мбіт/с** смуги
= **600 USD/міс** (економія у 5 разів vs T3)
= **автоматичний failover** при обриві одного T1

Реалізація: Cisco ISR G2 з 2 × T1

1. **Створити Multilink 1 з IP**

```
interface Multilink 1
 ip address 10.1.1.1 /30
```

2. **Bundle + автентифікація**

```
ppp multilink
 ppp multilink group 1
 ppp authentication chap
```

3. **Включити LFI (VoIP-friendly)**

```
ppp multilink interleave
 ppp multilink fragment delay 10
```

4. **QoS для голосу через LLQ**

```
service-policy output VOICE_QOS
```

5. **На кожному Serial: додати в bundle**

```
encapsulation ppp
 ppp multilink
 ppp multilink group 1
```

Сучасний контекст: чи актуальний MLPPP?

Місце MLPPP у сучасних мережах 2020-х років

Де MLPPP і досі використовується

Промислові об'єкти

SCADA, електростанції, нафтогазова галузь — де все ще використовуються T1/E1-канали.

Держсектор і оборона

Виділені захищені канали з подвоєнням для критичних систем.

Віддалені регіони

Де Ethernet недоступний, тільки leased lines від оператора: гірські райони, сільська місцевість.

Супутникові та радіорелейні лінки

Часто використовують PPP; агрегація каналів — типовий сценарій.

Сучасні альтернативи

1. **SD-WAN + гібридні канали**

Замість MLPPP на 2 × T1 — 1 канал Інтернет-broadband. SD-WAN дає динамічний failover через MPLS/LTE.

2. **LTE / 5G як WAN**

Мобільна мережа з 4G/5G дає 100+ Мбіт/с в місцях, де раніше було тільки T1.

3. **Metro Ethernet (Carrier Ethernet)**

Оператори більше пропонують Ethernet замість T1/E1 — EtherChannel заміщує MLPPP.

4. **SDN-керовані магістралі**

У ЦОД і магістралях — Segment Routing, EVPN замінюють традиційні PPP-технології.

Підсумок лекції

Ключові поняття MLPPP для Лабораторної роботи №4

01

MLPPP — RFC 1990

Multilink PPP: агрегація N фізичних каналів у 1 логічний Bundle

02

Bundle + Member Links

Multilink1 — логічний з IP; Serial 1/0..N — фізичні без IP

03

Фрагментація + Sequence

B/E-біти, 24 або 12-бітний Seq #, гарантія порядку пакетів

04

MRRU + балансування

MRRU — MTU для реасемблю; per-packet або per-fragment режим

05

LFI (RFC 2686/2687)

критично для VoIP на каналах < 768 кбіт/с; фрагменти 10-20 мс

06

CHAP і Cisco IOS

ppp multilink group N; CHAP-ім'я = ідентифікатор bundle



Ваші запитання

Обговорення матеріалу лекції

Дякую за увагу!