ЛЕКЦІЯ 7

Агрегування послідовних каналів WAN

протокол Multilink PPP (MLPPP, MP, RFC 1990)

Слайд 2. Пригадуємо лекції 5-6 та план лекції 7

Коротко пригадаємо ключове з двох попередніх лекцій. Лекція 5 — послідовні канали WAN, HDLC та PPP. Ми розглядали виділені канали T1 (1,544 Мбіт/с) та E1 (2,048 Мбіт/с), поняття DTE та DCE. Розібрали протокол HDLC (стандарт ISO/IEC 13239) з його Flag-байтами 0x7E, три типи кадрів (I, S, U). Розглянули різницю між ISO HDLC та Cisco HDLC (поле Type для мультипротокольності). Другу половину лекції присвятили протоколу PPP (RFC 1661): його стек протоколів LCP + NCP + автентифікація, 6-фазну машину станів, два протоколи автентифікації PAP і CHAP. Лекція 6 була про моделі надання послуг та QoS: метрики (bandwidth, delay, jitter, loss), моделі IntServ і DiffServ, механізми LLQ, WRED, shaping.

Сьогодні поглиблюємо тему PPP: розглянемо його розширення для агрегації каналів — MLPPP. План лекції такий. Спочатку — мотивація: три реальні причини, чому одного каналу WAN недостатньо. Далі — сама концепція MLPPP: історія, RFC 1990 і 2686, ключові переваги. Потім розберемо архітектуру: Bundle та Member Links. Далі — механіку роботи: фрагментація пакетів, структура MLPPP-заголовка, роль полів B, E, Sequence Number. Розглянемо ключові параметри MRRU та Sequence Number. Два режими балансування — per-packet і per-fragment — і чим вони відрізняються. Окремо детально — LFI для VoIP на повільних каналах. Потім практика: покрокове налаштування у Cisco IOS, приклади конфігів R_1 і R_2. Команди моніторингу та діагностики. Окремо — MLPPP з CHAP-автентифікацією. Порівняльна таблиця MLPPP vs EtherChannel vs ECMP. Типові проблеми та їх розв'язання. І, нарешті, практичний бізнес-сценарій: реальна задача агрегації 2 × T1 з VoIP, з розрахунком економічної вигоди. Завершимо обговоренням сучасного контексту MLPPP у 2020-х роках.

Слайд 3. Мотивація: чому одного каналу WAN мало

Розпочнемо з практичної мотивації. На слайді — три класичні проблеми, які реально виникають у клієнтів або у самих операторів.

Проблема перша — потрібно більше смуги. Уявіть реальну ситуацію: клієнт має один канал E1 = 2 Мбіт/с. Але його бізнес зростає, з'явилися нові послуги, і йому потрібно вже 6 Мбіт/с. Оператор пропонує наступний рівень — канал E3 з пропускною здатністю 34 Мбіт/с. Ціна — приблизно в 8-10 разів вища. Клієнт платитиме за 34 Мбіт/с, а використовуватиме лише 6. Це 5-кратна переплата за смугу, яка не потрібна.

Проблема друга — обмеження фізики. Стрибок з T1/E1 на T3/E3 — це не просто «швидший той самий канал». Це принципово інший тип обладнання: інші CSU/DSU, інші оптичні модулі, інші стандарти. У віддалених регіонах або на існуючій інфраструктурі може бути технічно неможливо отримати E3. А от додати ще один E1 — часто дуже просто.

Проблема третя — потрібна відмовостійкість. Один канал = єдина точка відмови. Якщо в цьому каналі щось відбувається (обрив волокна, знеструмлення обладнання оператора, помилки конфігурації) — маємо повний простій, доки провайдер не відновить. Для критичних систем це неприйнятно.

Розв'язок усіх трьох проблем — той самий: агрегація каналів. Об'єднати N фізичних каналів в один логічний з пропускною здатністю ~ N × швидкість одного, автоматичною відмовостійкістю (при відмові одного каналу інші продовжують працювати) і єдиною IP-адресою для маршрутизації. Ця ідея точно та сама, що ми обговорювали у лекції 3 для EtherChannel — але в WAN-середовищі. Стандарт, який це реалізує для PPP-каналів — MLPPP.

Слайд 4. MLPPP — Multilink PPP: концепція та історія

MLPPP — це розширення протоколу PPP, яке дозволяє об'єднати кілька фізичних PPP-каналів в один логічний канал, який називається bundle («пучок»). Стандарт — RFC 1990, автор Кіт Склоуер з UC Berkeley (той самий, що працював над BSD Unix). Рік — 1996.

Історія MLPPP цікава. Перша версія — RFC 1717 — була випущена ще у 1994 році. Але вона мала недоліки і в 1996-му була замінена на RFC 1990 (поточний стандарт). Пізніше з'явилися розширення: RFC 2686 і 2687 — це LFI (Link Fragmentation and Interleaving). RFC 2125 — це BAP/BACP (Bandwidth

Allocation Protocol) для динамічного додавання/видалення каналів на льоту, але цей протокол широкого поширення не набув. Альтернативні назви, які ви можете зустріти в літературі — MP, MLP, або просто «Multilink PPP». Всі означають одне й те саме.

Що дає MLPPP? П'ять основних переваг.

Перше — збільшена смуга. Ефективна пропускна здатність bundle приблизно дорівнює N × швидкість одного каналу мінус невеликий overhead (~ 3-5%) на MLPPP-заголовки.

Друге — відмовостійкість. При обриві одного з member links MLPPP АВТОМАТИЧНО (без ручного втручання адміністратора, без затримки на конвергенцію) переспрямовує трафік через канали, що залишилися. З точки зору маршрутизації нічого не змінюється — bundle як був up, так і залишається.

Третє — єдина IP-адреса. Маршрутизація й політики бачать один логічний інтерфейс Multilink X, а не N фізичних Serial. Це радикально спрощує конфігурацію: OSPF/BGP оголошують один інтерфейс, ACL і QoS-політики застосовуються один раз.

Четверте — балансування навантаження. Трафік автоматично розподіляється між каналами. Причому — і це унікальна властивість MLPPP — можлива навіть ФРАГМЕНТАЦІЯ пакетів між каналами (розглянемо на наступних слайдах).

П'яте — пакетна впорядкованість. MLPPP гарантує, що пакети приходять до приймача в тому ж порядку, в якому були відправлені. Це критично важливо для TCP: TCP сприймає переупорядкування пакетів як втрату і сповільнює передачу. Тому агрегація без гарантії порядку (наприклад, ECMP на L3) — це біль для TCP.

Слайд 5. Архітектура MLPPP: Bundle та Member Links

Розберемо архітектуру MLPPP на прикладі схеми з двома каналами. На слайді ви бачите: ліворуч маршрутизатор R_1 (DCE-роль), праворуч R_2 (DTE-роль). Між ними — два фізичні канали Serial 1/0 і Serial 1/1, кожен по 1,544 Мбіт/с (T1). Верхня оранжева стрічка — це і є bundle: N фізичних каналів → 1 логічний Multilink1.

Ключова концепція: в MLPPP є ДВА ТИПИ ОБ'ЄКТІВ. Перший — bundle (пучок). Це ЛОГІЧНИЙ інтерфейс, який у Cisco IOS називається Multilink X (де X — номер, наприклад Multilink 1). Саме bundle є носієм IP-адреси, MTU, налаштувань CHAP-автентифікації, QoS-політик. Маршрутизація, ACL, ACL і статистика — все бачить лише цей логічний інтерфейс. На нашій схемі bundle має IP-адреси 192.168.1.1/30 з боку R_1 і 192.168.1.2/30 з боку R_2. Маска /30 — стандартна для point-to-point каналів.

Другий тип об'єктів — Member Links. Це ФІЗИЧНІ Serial-інтерфейси (у нас Serial 1/0 і Serial 1/1), які включаються в bundle. Ключова особливість: member links НЕ мають своїх IP-адрес! Вони не беруть участі в маршрутизації самостійно. Їхня єдина функція — це переносити фрагменти або пакети MLPPP між двома пристроями на фізичному рівні.

Тепер про ефективну смугу. Якщо ми маємо 2 канали T1 по 1,544 Мбіт/с, то в сумі — 3,088 Мбіт/с. Але через overhead MLPPP (додаткові заголовки на кожен фрагмент або пакет) ефективна смуга буде трошки меншою, приблизно ~ 3 Мбіт/с. Overhead ~ 3-5% — це, скажімо, ціна за отримання відмовостійкості й балансування.

Кількість каналів в bundle теоретично не обмежена (у Cisco IOS до 2 мільярдів через 32-бітне поле group). На практиці рідко буває більше 10 каналів у bundle — для більших обсягів вже переходять на інші технології (Ethernet, MPLS).

Слайд 6. Фрагментація і MLPPP-заголовок

Тепер розберемо один із найцікавіших механізмів MLPPP — фрагментацію. Погляньте на верхню частину слайда: приклад передачі IP-пакета розміром 1500 байтів через 3 канали.

Уявіть, що на маршрутизатор надходить великий IP-пакет — 1500 байтів. У нас в bundle 3 канали. Є два варіанти, як передати цей пакет.

Варіант перший (примітивний): відправити ЦІЛИЙ пакет по одному з каналів. Тоді два інші канали в цей момент простоюють, і фактично ми маємо не «3 канали паралельно», а «один канал». Швидкість передачі пакета обмежена швидкістю одного каналу.

Варіант другий (розумний, який пропонує MLPPP): РОЗІРВАТИ пакет на 3 фрагменти приблизно по 500 байтів і відправити паралельно по всіх 3 каналах. Тоді пакет фактично передається у 3 рази швидше — використовується вся сумарна пропускна здатність bundle. Схема саме це і показує: Serial 1/0 несе Frag 1, Serial 1/1 несе Frag 2, Serial 1/2 несе Frag 3 — одночасно.

Але! Тепер маємо задачу на приймальній стороні: як зібрати ці 3 фрагменти назад у оригінальний пакет? Причому — фрагменти можуть прийти в неправильному порядку (наприклад, канали з різною затримкою), можуть загубитися. Для розв'язання цієї задачі MLPPP додає до КОЖНОГО фрагмента спеціальний заголовок.

Погляньте на нижню частину слайда — це структура MLPPP-заголовка на кожному фрагменті. Ключових полів чотири. Перше — B (Begin), 1 біт. Встановлюється в 1, якщо цей фрагмент — ПЕРШИЙ у оригінальному пакеті. Друге — E (End), 1 біт. Встановлюється в 1, якщо цей фрагмент — ОСТАННІЙ. Третє — 2 біти reserved (нулі). І четверте — Sequence Number: порядковий номер фрагмента. Може бути у двох форматах: розширений (long) — 24 біти, або короткий (short) — 12 біт. За замовчуванням Cisco використовує long.

Як приймач збирає пакет? Дуже просто. Він сортує фрагменти за Sequence Number. Знаходить фрагмент з B=1 — це початок пакета. Далі йде послідовність фрагментів з B=0 і E=0 (середина). Нарешті фрагмент з E=1 — це кінець. Всі фрагменти від B до E з послідовними Sequence Numbers складаються в один оригінальний пакет.

Що якщо якийсь фрагмент загубився? Наприклад, отримали фрагменти з Seq 100 (B=1), 101, 103 (E=1). Не вистачає 102. Приймач розуміє: розрив послідовності — пакет неможливо реасемблювати. Всі фрагменти цього пакета відкидаються. TCP на верхньому рівні виявить втрату і повторно надішле пакет.

Слайд 7. MRRU та Sequence Number

Тепер детальніше про два ключові параметри MLPPP, які потрібно розуміти для правильного налаштування.

Перший параметр — MRRU. Розшифровується як Maximum Receive Reconstructed Unit — «максимальний розмір реасембльованого пакета». Це, по суті, аналог MTU, але для MLPPP-bundle. Визначає найбільший пакет, який bundle може прийняти й зібрати після реасемблювання фрагментів.

Типові значення MRRU. За замовчуванням у більшості реалізацій — 1500 байтів (відповідає стандартному Ethernet MTU для сумісності). Cisco IOS часто ставить 1524 байти за замовчуванням (з невеликим запасом). У сучасних мережах, де використовуються jumbo frames, MRRU може досягати 9180 байтів — це особливо корисно для дата-центрових з'єднань.

MRRU узгоджується під час фази LCP — це фаза встановлення PPP-з'єднання, яку ми детально розглядали в лекції 5. Використовується спеціальна LCP-опція номер 17, яка називається Multilink-MRRU. Обидві сторони пропонують свої значення MRRU, і встановлюється МЕНШЕ з двох. Це стандартна логіка узгодження в PPP: якщо один пристрій може працювати з MRRU 9180, а інший — тільки з 1524, вибирається 1524.

Другий параметр — Sequence Number, порядковий номер фрагмента. Два формати. Long Sequence Number — 24 біти, дає 2 у степені 24 ≈ 16,7 мільйонів унікальних номерів. Використовується за замовчуванням. Такого запасу достатньо навіть для дуже швидких каналів — переповнення відбувається лише через дуже тривалий час, і воно оброблене в стандарті. Short Sequence Number — 12 біт, дає лише 4096 номерів. Використовується для економії пропускної здатності (кожен фрагмент має менший заголовок на 12 біт). У Cisco IOS активується командою ppp multilink fragment-delay X (short формат).

Три функції Sequence Number: перше — впорядкування, приймач знає, як відсортувати фрагменти навіть якщо вони прийшли не по порядку. Друге — виявлення пропусків: якщо номер 5 прийшов, а 4 ні — щось загубилось. Третє — визначення меж пакетів разом з бітами B і E.

Слайд 8. Балансування навантаження в MLPPP

На попередньому слайді ми обговорили механіку фрагментації. Тепер — про два принципово різні режими балансування навантаження в MLPPP: per-packet і per-fragment.

Per-packet Load Balancing (ліворуч на слайді). Це найпростіший режим. Принцип — round-robin: пакет 1 надсилається через канал A, пакет 2 через канал B, пакет 3 через канал C, пакет 4 знову через A, і так далі. Пакети НЕ фрагментуються — кожен пакет цілком потрапляє на один канал. Плюси: простий, менший CPU-навантаження, менший MLPPP-overhead (не треба заголовку фрагмента). Мінуси: немає паралельної передачі ОДНОГО пакета — його швидкість обмежена швидкістю одного каналу. І серйозний ризик — переупорядкування пакетів. Уявіть: пакет 1 йде через канал A з затримкою 5 мс, пакет 2 через канал B з затримкою 2 мс. Пакет 2 прийде РАНІШЕ пакета 1. TCP сприйме це як втрату пакета 1 і сповільнить швидкість.

Per-fragment Load Balancing (праворуч). Це основний режим MLPPP. Принцип — кожен пакет розрізається на фрагменти, і фрагменти паралельно розкидаються по каналах. Ми детально це розглядали на слайді 6. Плюси серйозні: реально досягається N × швидкість одного каналу (справжнє паралельне використання), порядок пакетів гарантований завдяки Sequence Number, оптимально для великих пакетів. Мінуси: вищий CPU-overhead (фрагментація на передавачі + реасемблювання на приймачі), додатковий MLPPP-заголовок на КОЖЕН фрагмент.

Головна практична проблема per-fragment у реальних мережах — waiting-затримка на реасемблюванні. Якщо один із каналів у bundle має вищу затримку (наприклад, довший фізичний шлях), приймач мусить ЧЕКАТИ повільніший фрагмент, щоб зібрати оригінальний пакет. Затримка bundle стає рівною затримці найповільнішого каналу. Тому важлива вимога: канали в одному bundle мають бути ПОХОЖИМИ за характеристиками — швидкістю й затримкою.

У Cisco IOS фрагментація за замовчуванням УВІМКНЕНА, тобто використовується per-fragment режим. Якщо потрібно вимкнути (наприклад, для трафіку де важливий не throughput, а низька затримка), використовується команда ppp multilink fragment disable.

Слайд 9. LFI — Link Fragmentation and Interleaving

Тепер детально про LFI — Link Fragmentation and Interleaving. Це розширення MLPPP, спеціально розроблене для передачі VoIP на повільних каналах. Стандарти — RFC 2686 і 2687, обидва від 1999 року.

Проблема, яку розв'язує LFI. Уявіть канал з пропускною здатністю 128 кбіт/с — це типова швидкість для ISDN або старих WAN-каналів. Тепер уявіть, що у вас передається великий IP-пакет розміром 1500 байтів. Скільки часу потрібно, щоб «виштовхнути» усі 1500 байтів = 12000 бітів через канал 128000 біт/с? Відповідь: 12000 / 128000 = 0,094 секунди = 94 мілісекунди. Це час серіалізації.

Тепер уявіть, що якраз під час передачі цього великого пакета до інтерфейсу приходить VoIP-пакет. VoIP-пакет БЛОКУЄТЬСЯ в черзі — він мусить чекати, поки завершиться передача великого пакета. Максимальна затримка чекання — ті самі 94 мс. А у нас нагадаю: допустимий джитер для VoIP — не більше 30 мс. Затримка 94 мс перевищує допустиму у 3 РАЗИ. Голос стає перерваним, з echo, з клацаннями. Якість катастрофічно падає.

Ось у чому дилема: сама черга LLQ, яку ми обговорювали в лекції 6, тут не допомагає. Навіть якщо VoIP у пріоритетній черзі — він мусить чекати, поки маршрутизатор фізично «доштовхне» останній біт великого пакета через інтерфейс. Це — фундаментальне обмеження, не пов'язане з чергами.

LFI розв'язує це елегантно, у два кроки. Крок перший — Fragmentation (не плутати з фрагментацією MLPPP для балансування!): великі пакети РІЖУТЬСЯ на маленькі шматочки такого розміру, щоб час серіалізації кожного шматочка становив 10-20 мс (це Cisco-рекомендація). Крок другий — Interleaving («вставляння»): між фрагментами великих пакетів ВСТАВЛЯЮТЬСЯ VoIP-пакети, які через свою малість пересилаються цілком, без чекання.

Погляньте на візуалізацію внизу слайда. Без LFI: маємо один великий блок Data 1500 Б (94 мс), і одразу за ним VoIP-пакет чекає ці всі 94 мс. З LFI: великий пакет ділиться на 4 фрагменти D-1, D-2, D-3, D-4, і між ними інтерлівуються VoIP-пакети V, V, V. Тепер VoIP-пакет чекає МАКСИМУМ 10-20 мс — час одного фрагмента, а не весь пакет.

Важливий момент: LFI критично потрібен на каналах менше 768 кбіт/с. На швидких каналах (T1 і вище) серіалізація великих пакетів вже стає малою (наприклад, 1500 Б на T1 = 7,8 мс, що менше 30 мс джитеру), і LFI не потрібен.

Слайд 10. Налаштування MLPPP у Cisco IOS: покроково

Тепер практична частина — покрокове налаштування MLPPP у Cisco IOS. Ліворуч на слайді — 6 обов'язкових кроків, праворуч — реальний повний конфіг для R_1.

Крок перший — створити ВІРТУАЛЬНИЙ Multilink-інтерфейс командою interface Multilink 1. Це і є наш bundle. У Cisco IOS Multilink-інтерфейси створюються так само, як інтерфейси Loopback — вони не існують фізично, тільки логічно.

Крок другий — призначити IP-адресу НА MULTILINK, не на фізичних Serial. Ключове розуміння: bundle є носієм IP, а не окремі канали. У прикладі — 192.168.1.1 з маскою /30.

Крок третій — увімкнути multilink і задати номер групи. Дві команди: ppp multilink (загальний прапорець) і ppp multilink group 1 (номер групи, який повинен бути на всіх фізичних інтерфейсах, що включаються в bundle).

Тепер переходимо до кожного фізичного Serial. Крок четвертий — обов'язково встановити encapsulation ppp. HDLC (за замовчуванням у Cisco IOS) не підтримує MLPPP; тому потрібно явно переключитися на PPP.

Крок п'ятий — на КОЖНОМУ фізичному Serial включити його в групу тими самими двома командами: ppp multilink і ppp multilink group 1. Номер групи МАЄ ЗБІГАТИСЯ з номером Multilink-інтерфейсу.

І крок шостий — no shutdown на всіх інтерфейсах (Multilink і фізичних).

Праворуч — повний конфіг R_1 з двома фізичними Serial-каналами. Зверніть увагу: clock rate 64000 налаштовується на фізичних Serial (DCE-роль), а НЕ на Multilink. IP-адреса — навпаки, тільки на Multilink, не на фізичних. Це важливо: якщо помилково додати ip address на фізичний Serial після включення його в bundle — це буде помилка конфігурації, канал не працюватиме.

На R_2 конфіг ідентичний, тільки IP буде 192.168.1.2/30, а clock rate не задається (R_2 — DTE).

Слайд 11. Моніторинг та діагностика MLPPP

Тепер команди для перевірки, що ми правильно налаштували. У таблиці — 7 найважливіших команд.

Головна команда — show ppp multilink. Показує загальну інформацію про всі MLPPP-bundle на пристрої. Приклад виводу — внизу слайда, розберемо його.

Show ppp multilink active — показує ЛИШЕ активні bundle. Корисно, якщо у вас багато сконфігурованих, а не всі працюють.

Show ppp multilink interface Multilink 1 — детальна інформація про конкретний bundle.

Show interface Multilink 1 — стан логічного інтерфейсу: IP, MTU, статистика (пакетів прийнято/передано, помилки).

Show interface Serial 1/0 — стан члена bundle. Має показувати «LCP Open» — якщо ні, значить PPP взагалі не піднявся, і в bundle цей канал не додасться.

Debug ppp multilink events — трасування подій MLPPP: коли канал додається до bundle, видаляється, коли bundle стає up/down. Корисно при діагностиці проблем.

Debug ppp multilink fragments — детальне трасування самої фрагментації: які пакети фрагментуються, які Sequence Numbers, які фрагменти прийшли. Але це продукує ДУЖЕ багато виводу — використовувати обережно.

Тепер розберемо приклад виводу show ppp multilink внизу слайда. Перший рядок: «Multilink1, bundle name is R_2» — це наш bundle Multilink1, ім'я bundle взяте з CHAP-імені сусіда R_2 (буде далі на слайді 12). «Endpoint discriminator is R_2» — унікальний ідентифікатор bundle. «Bundle up for 00:03:24» — bundle працює 3 хвилини 24 секунди. «Total bandwidth 128» — поточна сумарна пропускна здатність 128 кбіт/с (у нашому прикладі 2 канали по 64 кбіт/с). «Member links: 2 active, 0 inactive» — 2 канали активні, 0 неактивних. Далі — список: Serial1/0 і Serial1/1 з часом їх додавання. Якщо один канал випаде — статус зміниться на inactive.

Слайд 12. MLPPP + автентифікація CHAP

Тепер про поєднання MLPPP з автентифікацією CHAP. Це важлива тема для реальних мереж, де ми не можемо просто дозволити будь-кому підключатися до наших PPP-каналів.

Ключове розуміння: автентифікація CHAP в MLPPP виконується НА КОЖНОМУ member link ОКРЕМО. Тобто, якщо в bundle 2 канали — CHAP-обмін відбувається 2 рази, для кожного каналу свій. Це необхідно, бо кожен канал теоретично може підключати різних сусідів (хоча на практиці всі канали bundle йдуть до одного сусіда).

І тепер найцікавіше — як MLPPP визначає, що ці 2 канали належать одному bundle? Відповідь: за CHAP-ім'ям сусіда! MLPPP ВИКОРИСТОВУЄ CHAP-ім'я як ідентифікатор bundle. Всі канали, що прийшли від того самого username, автоматично об'єднуються в один bundle. Це — елегантний механізм автоматичного bundling: не треба явно вказувати, що канал X належить bundle Y — MLPPP визначає це за автентифікацією.

Що якщо CHAP не пройшов на якомусь каналі? Цей канал просто НЕ ДОДАЄТЬСЯ в bundle. Але bundle продовжує працювати з успішно автентифікованими каналами. Тобто автентифікація не блокує bundle цілком, лише окремі канали.

Є ще один механізм ідентифікації — Endpoint Discriminator, визначений у RFC 1990. Це резервний механізм, який працює навіть без CHAP (для випадків, коли автентифікація не потрібна). За замовчуванням у Cisco це hostname пристрою. Можна змінити командою ppp multilink endpoint.

Праворуч — приклад конфігу з CHAP. Головні речі, які треба помітити: команда username R_2 password mypass — це, як ми обговорювали в лекції 5, ім'я СУСІДА (не своє власне). Команда ppp authentication chap ставиться і на Multilink-інтерфейсі (застосовується до всього bundle), і на кожному фізичному Serial (щоб автентифікація реально виконувалась при піднятті кожного каналу).

Слайд 13. MLPPP vs EtherChannel vs ECMP

Систематизуємо три різні технології агрегації каналів, кожна з яких працює у своєму середовищі. Порівняємо MLPPP, EtherChannel (LACP) і ECMP.

Стандарти. MLPPP — RFC 1990 (IETF, 1996). EtherChannel — IEEE 802.1AX. ECMP — не окремий стандарт, а функція протоколів маршрутизації OSPF, EIGRP, BGP.

Рівень OSI. MLPPP і EtherChannel — L2 (канальний рівень). ECMP — L3 (мережевий рівень).

Середовище. MLPPP — WAN, Serial/PPP-канали. EtherChannel — LAN, Ethernet. ECMP — будь-яке з IP-маршрутизацією.

Кількість каналів. MLPPP теоретично не обмежена (32-бітне поле), реально до 10. EtherChannel — до 8 активних + до 8 в режимі гарячого резерву. ECMP — не обмежена (залежить від протоколу).

Фрагментація пакетів — унікальна риса MLPPP! Тільки MLPPP підтримує розбиття пакета на фрагменти й паралельну передачу між каналами. EtherChannel і ECMP розподіляють ТІЛЬКИ ЦІЛІ пакети. Це наслідок фундаментальної відмінності: MLPPP спеціально розроблений для повільних WAN-каналів, де фрагментація дає реальний виграш; EtherChannel і ECMP — для швидких каналів, де фрагментація не потрібна і навіть шкідлива (додатковий overhead).

Гарантія порядку. MLPPP — так, гарантована через Sequence Number. EtherChannel — так, В МЕЖАХ flow (потоку). ECMP — НЕ гарантована, може переупорядкувати пакети (тому ECMP балансує per-flow, а не per-packet).

Балансування. MLPPP — per-packet або per-fragment. EtherChannel — хеш flow (за MAC/IP/port). ECMP — per-flow.

Автентифікація. MLPPP — CHAP/PAP. EtherChannel — LACP hello. ECMP — автентифікація протоколів маршрутизації (OSPF password, BGP MD5).

Практичне правило (у нижньому банері): WAN (Serial, PPP) → MLPPP. LAN (Ethernet) → EtherChannel. L3 з BGP/OSPF → ECMP.

Слайд 14. Типові проблеми MLPPP та їх діагностика

Розберемо чотири найпоширеніші проблеми, з якими ви можете зіткнутися при налаштуванні MLPPP. Ці помилки типові для лабораторних робіт.

Проблема перша — Bundle не піднімається. Симптом: Multilink1 у стані down, а фізичні member links працюють як окремі PPP-канали. Причина зазвичай — на фізичних інтерфейсах не вказано ppp multilink group N, або encapsulation залишився hdlc (за замовчуванням). Розв'язання: перевірити, що на КОЖНОМУ Serial встановлено encapsulation ppp I ppp multilink group X.

Проблема друга — тільки один канал в bundle. Симптом: bundle працює, але member links = 1. Смуга не збільшена. Причини можливі дві. Перша — різні номери groups на різних боках. На R_1 ppp multilink group 1, а на R_2 випадково ppp multilink group 2 — вони не об'єднаються. Друга причина — при використанні CHAP: hostname або CHAP username не збігаються з іменами каналів на іншому боці. Розв'язання: перевірити ідентичність ppp multilink group N; перевірити правильність username X.

Проблема третя — пакети переупорядковуються. Симптом: TCP-throughput нижчий за очікуваний; ping показує inconsistent RTT (варіативний час відгуку). Причина — канали в bundle мають різну затримку або швидкість (нерівнозначні канали). Наприклад, один канал T1 (1,544 Мбіт/с), інший E1 (2,048 Мбіт/с). Або обидва T1, але один через супутник з великою затримкою. Фрагменти по швидкому каналу приходять раніше, приймач має чекати повільні. TCP на це реагує сповільненням. Розв'язання: використовувати канали з ОДНАКОВИМИ характеристиками; або вимкнути фрагментацію командою ppp multilink fragment disable.

Проблема четверта — VoIP-затримка занадто велика. Симптом: голос переривається, echo, погана якість, особливо на повільних каналах. Причина — той самий serialisation delay, який ми обговорювали на слайді про LFI: великі data-пакети блокують голосові. Розв'язання: увімкнути LFI. Команди: ppp multilink interleave (увімкнути інтерлівинг) і ppp multilink fragment delay 10 (задати максимальну затримку фрагмента 10 мс).

Слайд 15. Практичний сценарій: 2 × T1 з VoIP

Тепер розглянемо ВСЕ, що ми обговорили, у комплексному практичному сценарії. Це реальна задача, яка виникає в філіальних мережах.

Приклад. Мережа філії потребує приблизно 3 Мбіт/с смуги (для звичайних даних + голосового трафіку). Потрібна підтримка VoIP на 20 одночасних

викликів (кожен VoIP-виклик з кодеком G.711 займає приблизно 90 кбіт/с з overhead, тобто 20 × 90 = 1,8 Мбіт/с — це вписується в 3 Мбіт/с). І критично важлива відмовостійкість — недопустимий повний простій каналу.

Що пропонує оператор. Варіант перший: канал T1 (1,544 Мбіт/с) за 300 доларів на місяць. Варіант другий: канал T3 (45 Мбіт/с) за 3000 доларів на місяць.

Проаналізуємо. Якщо взяти один T1 — 1,544 Мбіт/с. Це МЕНШЕ, ніж потрібно (3 Мбіт/с). Не підходить. Якщо взяти T3 — 45 Мбіт/с. Це в 15 РАЗІВ БІЛЬШЕ, ніж потрібно. Ми переплачуємо в 10 разів (3000 vs 300) за пропускну здатність, яку не використовуємо. І ще один момент: T3 — це один канал. Якщо він відмовить — маємо повний простій.

Рішення MLPPP. Беремо ДВА канали T1 і об'єднуємо їх у MLPPP-bundle. Отримуємо приблизно 3 Мбіт/с (з overhead ~ 3-5%) — ТОЧНО стільки, скільки треба. Вартість — 600 доларів на місяць (2 × 300). Це в 5 РАЗІВ ДЕШЕВШЕ, ніж T3! І ще критично важливе — при обриві одного T1 bundle АВТОМАТИЧНО продовжує працювати через другий канал. Хай зі зменшеною смугою (1,544 Мбіт/с — половина), але не нуль. У цей час звичайні дані можуть тимчасово сповільнитись, але VoIP-виклики продовжуватимуть працювати.

5 ключових кроків реалізації на Cisco ISR G2. Крок 1: створити Multilink 1 з IP. Крок 2: увімкнути bundle і CHAP-автентифікацію. Крок 3: обов'язково увімкнути LFI командами ppp multilink interleave + ppp multilink fragment delay 10 — це ключове для VoIP-підтримки на T1 (при 20 одночасних викликах серіалізаційна затримка стає проблемою). Крок 4: застосувати QoS-політику LLQ для пріоритизації голосу. Крок 5: на кожному Serial-каналі — encapsulation ppp + ppp multilink + ppp multilink group 1.

Слайд 16. Сучасний контекст: чи актуальний MLPPP?

Тепер чесна оцінка сучасного стану MLPPP. Це не найновіша технологія — вона з 1996 року. Треба розуміти, де вона досі актуальна, а де вже витіснена сучасними альтернативами.

Де MLPPP ДОСІ використовується. Перше — промислові об'єкти: SCADA-системи, електростанції, нафтогазова галузь. Там усе ще широко

використовуються T1/E1-канали як стійка, перевірена десятиліттями технологія. Промислова інфраструктура змінюється повільно. Друге — держсектор і оборона: виділені захищені канали з обов'язковим подвоєнням для критичних систем. Тут MLPPP цінується за передбачуваність і відсутність зайвих інтелектуальних компонентів, які можна взламати. Третє — віддалені регіони: гірські райони, сільська місцевість, де Ethernet-канали від операторів просто недоступні, і єдина опція — це leased lines. Четверте — супутникові та радіорелейні лінки: тут PPP залишається типовим протоколом канального рівня, і агрегація каналів — це стандартний сценарій.

Сучасні альтернативи. Перше — SD-WAN + гібридні канали. Замість MLPPP на 2 × T1 сучасний підхід — один канал Інтернет-broadband, SD-WAN дає динамічний failover через MPLS або LTE-резерв. Друге — LTE/5G як WAN. Мобільна мережа з 4G/5G дає 100+ Мбіт/с в місцях, де раніше було тільки T1 — це радикально змінює економіку. Третє — Metro Ethernet: оператори більше пропонують Ethernet-канали замість T1/E1, і EtherChannel там заміщує MLPPP. Четверте — SDN-керовані магістралі: у дата-центрах і магістралях великих операторів Segment Routing і EVPN заміняють традиційні PPP-технології.

Але з навчальної точки зору MLPPP залишається дуже цінним матеріалом. Він добре ілюструє ФУНДАМЕНТАЛЬНІ принципи агрегації каналів: фрагментацію, впорядкування, автентифікацію, автоматичний failover. Ці принципи використовуються у BCIX інших технологіях агрегації, включно з EtherChannel і сучасними SD-WAN. Тому вивчати MLPPP — важливо як загальну концептуальну базу, а не лише як практичну технологію для роботи з T1.

Слайд 17. Підсумок лекції

Підбиваємо підсумки. Шість ключових ідей сьогоднішньої лекції.

Перше: MLPPP — Multilink PPP, стандарт RFC 1990 (1996). Дозволяє агрегувати N фізичних PPP-каналів в один логічний Bundle.

Друге: два типи об'єктів — Bundle (логічний інтерфейс Multilink X з IP-адресою) і Member Links (фізичні Serial-канали БЕЗ власних IP).

Третє: фрагментація та Sequence Number. Пакет може ділитися на фрагменти між каналами. Кожен фрагмент має заголовок з бітами B/E і 24-бітним (long) або 12-бітним (short) Sequence Number — це забезпечує впорядкованість пакетів після реасемблювання.

Четверте: MRRU — це аналог MTU для реасембльованого пакета, узгоджується через LCP-опцію 17. Два режими балансування — per-packet (без фрагментації) або per-fragment (за замовчуванням у Cisco).

П'яте: LFI — критично важливе розширення для VoIP на каналах менше 768 кбіт/с. Великі пакети розбиваються на 10-20 мс фрагменти, між ними вставляються голосові пакети. Стандарти RFC 2686 і 2687.

Шосте: практика в Cisco IOS. Ключові команди: interface Multilink X, ppp multilink group N, encapsulation ppp на фізичних Serial. CHAP-ім'я сусіда використовується як ідентифікатор bundle — це основа автоматичного bundling.