

ATM-tekniikka

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU

Tietotekniikan koulutusohjelma

Tietoliikennetekniikka

Opinnäytetyö

Kevät 2008

Mikko Grönlund

TIIVISTELMÄ

Asynchronous Transfer Mode (ATM) on pakettikytkentäinen, yhteydellinen siirtoyhteykskerroksen protokolla, joka segmentoi verkkokerroksen vaihtuvamittaiset paketit määrämittäisiin soluihin ja siirtää ne ennalta muodostettuja loogisia virtuaaliyhteyksiä pitkin.

Tämän opinnäytetyön teoriaosassa on peruskäsitteiden lisäksi käsitelty CLIP ja LANE, joita käytetään lähiverkkoemulointiin. Näiden lisäksi on käsitelty MPOA, MPLS ja PNNI, joista MPOA ja MPLS laajentavat ATM:n verkkokerrokselle, ja PNNI on ATM:n reititys- ja signaalintiprotokolla. Käytännön osassa on keskitytty 1483-kapselointiin, joka sillattuna kanavoi protokollat samaan virtuaalikanavaan ja reititettyinä omiin virtuaalikanaviinsa, LAN-emulointiin ja QoS:ään. Käytettyjen laitteiden määrän ja ominaisuuksien johdosta kaikkia teoriaosassa käsiteltyjä tekniikoita ei ole testattu käytännössä. Tarkoituksena on ollut antaa ohjeet tekniikoiden käyttöönottoon niin kuin se on pienessä laboratorioverkossa mahdollista, määrittää kaistanleveysparametrit DVD-videon virheettömään siirtoon ylivaraamatta resursseja ja osoittaa eri liikennetyyppien prioriteetit toisiinsa nähden.

Käytännön toteutuksessa on käytetty pysyvästi muodostettuja yhteyksiä, joten PNNI:tä ei ole käytetty. Tuettujen tekniikoiden testauksessa on riittänyt ping-komennon onnistuminen. Tracert-komentoa on käytetty reititystietojen tulostamiseen. Palvelun laatua on testattu rajoittamalla virtuaalipolun kaistanleveyttä ja vertaamalla sen vaikutusta eri liikennetyyppihin sekä analysoimalla videon laatua tiedonsiirron jälkeen kaistanleveyden funktiona. Videon laadun parametrit on esitetty MOS-arvoina.

Tulosten perusteella ATM vaatii solutasolla moninkertaisen kaistanleveyden verrattuna videon synnyttämään bittivirtaan verkkokerroksella, koska saman nopeuden saavuttaakseen paketit on ehdittävä segmentoida ja solut koottava uudelleen. Solutason kaistanleveys laski vain 20 % bittivirran puolittuessa. Sama 20 % voidaan vielä tinkiä kaistanleveydestä videon laadun siitä häiritsevästi heikkenemättä. Seuraava askel olisi ollut verrata pakkausalgoritmien tehokkuutta ja laatua ja testata kuinka alas bittivirta ja ylivarauksen avulla kaistanleveys voidaan asettaa laadun siitä havaittavissa määrin heikkenemättä. Koska algoritmien vertaamiseen soveltuvan ohjelmiston ilmainen koeversio oli liian rajoittunut ja liikenteen tuottaminen vaikeaa PCR/SCR-suhteen ollessa suuri, rajattiin algoritmien tarkempi vertailu tämän opinnäytetyön ulkopuolelle.

Asiasanat: ATM, LANE, MOS, MPLS, QoS

Lahti University of Applied Sciences
Faculty of Technology

GRÖNLUND, MIKKO: ATM Technology

Bachelor's Thesis of Telecommunications Technology, 80 pages, 11 appendices

Spring 2008

ABSTRACT

Asynchronous Transfer Mode (ATM) is a packet switching, connection-oriented data link layer protocol, which segments variable-sized network layer packets into fixed-sized cells, and transfers them via pre-established logical virtual circuits.

In addition to the basic concepts, the theory part covers LAN emulation technologies CLIP and LANE. Also MPOA and MPLS, which extend ATM to the network layer, and ATM routing and signaling protocol PNNI are covered. The practical part focuses on 1483 encapsulation methods, LAN emulation, and QoS. The two encapsulation methods covered are bridged 1483, which multiplexes multiple protocols over a single virtual circuit, and routed 1483, which carries each protocol over a separated virtual circuit. Due to the number of devices used and their properties, not all technologies have been tested. The aim has been to provide a quick start guide for implementation as much as it is possible in a small LAN, to determine proper bandwidth parameters for transferring DVD video flawlessly without over-reserving bandwidth, and to show the different priorities of different traffic types.

The implementation has been carried out by using permanent virtual circuits, so PNNI has not been used. A successful ping command is viewed sufficient for testing supported technologies. A tracert command is used to output routing information. The quality of service is tested by limiting the bandwidth of a virtual path, comparing the effects on different traffic types, and analyzing the quality of a transferred video as a function of bandwidth. The quality parameters of the video are presented as MOS values.

According to the results, ATM requires a multifold of bandwidth at the cell level in comparison with the bit rate of the video at the network layer because, to achieve the same speed of transmission, the segmentation and reassembly of the packets must be accomplished. When the bit rate of the video halved, the cell level bandwidth dropped only by 20 %. The same 20 % can be reduced from the bandwidth without compromising the video quality too much. Had not the demo version of the video quality measurement tool been too limited, and the generation of traffic difficult due to high PCR/SCR ratio, the next step would have been to assess the efficiency and quality of the different compression algorithms, and to test how much the bit rate, and the bandwidth through overbooking, can be reduced without compromising the video quality. Because of the limitations, these objectives require further study.

Key words: ATM, LANE, MOS, MPLS, QoS

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
1.1	Työn tausta	1
1.2	Työn tavoitteet	1
2	ASYNCHRONOUS TRANSFER MODE	3
2.1	ATM-arkkitehtuuri	3
2.2	Virtuaalipolut (Virtual Paths)	10
2.3	Classical IP (CLIP)	16
2.4	Emulated LAN (ELAN) ja LAN Emulation (LANE)	17
2.5	Multi-Protocol over ATM (MPOA)	26
2.6	Private Network-to-Network Interface / Private Network Node Interface (PNNI)	29
2.7	ATM-yhteenvedo	35
3	MULTI-PROTOCOL LABEL SWITCHING	36
3.1	MPLS-arkkitehtuuri	36
3.2	Resource Reservation Protocol (RSVP)	39
3.3	Label Distribution Protocol (LDP)	42
3.4	DiffServ ja IntServ	44
3.5	MPLS over ATM	47
3.6	MPLS-yhteenvedo	48
4	KÄYTÄNNÖN TESTIT	49
4.1	Testiympäristön kuvaus	49
4.2	Sillattu 1483	50
4.3	Reititetty 1483	54
4.4	LAN Emulation	55
4.5	Classical IP	64
4.6	Quality of Service	64
5	YHTEENVETO	77
	LÄHTEET	79
	LIITTEET	81

LYHENNELUETTELO

ABR	Available Bit Rate, palveluluokka, joka jakaa yhteyksille kaistanleveyttä vain mahdollisuuksien mukaan taatun MCR:n lisäksi
AFI	Authority and Format Identifier, NSAP-osoitteen osa, joka tunnistaa osoitteen IDI-osan
ARP	Address Resolution Protocol, protokolla MAC-osoitteen selvittämiseksi, kun tiedetään sitä vastaava IP-osoite
B-ICI	Broadband Inter-Carrier Interface, ITU-T:n standardi laajakaistaisen kytkettyjen virtuaaliyhteyksien hallinnoimiseksi yleisten verkkojen välillä
B-ISDN	Broadband Integrated Services Digital Network, ITU-T:n standardi suuren kaistanleveyden sovellusten käsittelyyn yleisissä verkoissa
BT	Burst Tolerance, määrittää PCR:n ja SCR:n kanssa MBS:n
BUS	Broadcast and Unknown Server, välityspalvelin ELAN:ssa
CAC	Connection Admission Control, hyväksyy tai hylkää yhteyden sen luontivaiheessa riippuen sen vaikutuksesta olemassa olevien yhteyksien QoS-takuisiin
CBR	Constant Bit Rate, palveluluokka liikenteelle, joka vaatii tarkan kellotuksen
CDV	Cell Delay Variation, solujen siirtoviiveen osatekijä, joka johtuu puskuroinnista ja solujen järjestämisestä

CDVT	Cell Delay Variation Tolerance, hyväksyttävä vaihtelu solujen saapumisaikojen välillä
CLIP	Classical IP, määrittäminen IP:n käytöstä ATM-verkossa käyttäen hyväksi ATM:n ominaisuuksia
CLP	Cell Loss Priority, määrittää todennäköisyyden solun hylkäämiselle verkon ruuhkatilanteessa
CLR	Cell Loss Ratio, ATM:ssä hukattujen ja onnistuneesti siirrettyjen solujen välinen suhde
CoS	Class of Service, ylemmän kerroksen protokollan vaatimus koskien sitä, miten alemman kerroksen protokollan tulisi käsitellä sen lähettämää tietoa
CPCS	Common Part Convergence Sublayer, palveluriippumaton alempi CS-alikerros, joka vastaa tiedon esikäsittelystä siirtoa varten
CS	Convergence Sublayer, vastaa trailerin liittämistä virheiden tarkistusta varten SSCS:ltä saatuihin PDU:ihin, jotka täytetään tarvittaessa 48:lla jaollisiksi ja siirretään SAR:lle
CSU/DSU	Channel Service Unit / Data Service Unit, siltaa asiakas- ja operaattoriverkon
CTD	Cell Transfer Delay, kulunut aika yhteyden solun lähdön UNI:stä ja tulon UNI:hin välillä, solmujen siirto- ja käsittelyviiveiden summa kahden ATM-pisteen välillä
DCC	Data Country Code, ATM Forumin yksi osoiteformaatti yksityisiin verkkoihin, toinen on ICD

DiffServ	Differentiated Services, verkonhallintamalli eri palveluluokkien tarjoamiseksi eri liikennetyypeille; se voi taata QoS:n vain, jos reitittimet tulkitsevat ohjeita yhdenmukaisesti
DLE	Distributed LAN Emulation, mahdollistaa LES/BUS-palveluiden jakamisen useille palvelimille tarjoten vikasietoisuuden ja kuorman jakamisen ELAN:ssa
DSP	Domain Specific Part, NSAP-osoitteen osa, joka sisältää area-tunni- niseen, ESI:n ja SEL:n
DTL	Designated Transit List, lista solmuista, jotka määrittävät reitin vertaisverkon yli
ELAN	Emulated LAN, emuloitu Ethernet- tai Token Ring -verkko ATM- verkossa
ES	End System, päätelaite tai ei-reitittävä verkkosolmu
ESI	End System Identifier, NSAP-osoitteen osa, joka erottaa ES:t toi- sistaan
FEC	Forwarding Equivalence Class, kuvaa paketteja, jotka voidaan vä- littää samalla tavalla eli ne voidaan yhdistää samaan MPLS-otsik- koon
GCRA	Generic Cell Rate Algorithm, määrittää, noudattavatko solut lii- kennesopimustaan
GFC	Generic Flow Control, mahdollistaa usean laitteen erottamisen toi- sistaan, jotka käyttävät samaa ATM-rajapintaa
HEC	Header Error Control, laskee tarkistussumman ATM-solun otsak- keen neljästä ensimmäisestä tavusta

HO-DSP	High Order Domain Specific Part, NSAP-osoitteen osa, joka jakaa reititysalueen (routing domain) pienempiin hallintoalueisiin (area)
ICD	International Code Designator, ATM Forumin yksi osoiteformaatti yksityisiin verkkoihin, toinen on DCC
IDI	Initial Domain Identifier, NSAP-osoitteen osa, joka määrittää osoitteen hallintoviranomaisen
IDP	Initial Domain Part, NSAP-osoitteen osa, joka sisältää AFI:n ja IDI:n DCC- ja ICD-osoitteissa ja routing domain -tunnisteen edellisten lisäksi E.164-osoitteesta koodatussa NSAP-osoitteessa
IGP	Interior Gateway Protocol, reititysprotokolla autonomisen alueen (routing domain) sisällä
ILMI	Interim Local Management Interface, ATM Forumin määrittäminen verkkohallinnan sisällyttämiseksi ATM UNI:hin
IntServ	Integrated Services, QoS:n takaava verkkohallintamalli, jonka vaatimat resurssit kasvavat verkon kasvaessa, koska reitittimien täytyy ylläpitää tietoja yhteyksistä ja niille varatuista resursseista
IARP	Inverse ARP, mahdollistaa SVC:t ARP-palvelimen selvittäessä päätelaitteen IP-osoitteen
LANE	LAN Emulation, ATM Forumin määrittäminen ATM-verkon toiminnasta LAN-verkkona
LDP	Label Distribution Protocol, signaalintiprotokolla otsikoiden jakamiseksi MPLS-verkossa
LEC	LAN Emulation Client, ES:n alijärjestelmä, joka toimii tiedonvälittäjänä ja selvittää ATM-osoitteita MAC-osoitteista

LECS	LAN Emulation Configuration Server, vastaa LEC:iden peruskonfiguraatiosta
LES	LAN Emulation Server, tarjoaa osoitteiden rekisteröintipalvelun ja selvittää MAC-osoitteita vastaavat ATM-osoitteet ELAN:ssa
LGN	Logical Group Node, solmu, joka edustaa vertaisryhmäänsä ylemmällä tasolla
LIFO	Last in, First out, tietopino, johon viimeksi lisätty tietoyksikkö poistetaan siitä ensimmäisenä
LIS	Logical IP Subnet, ryhmä samaan aliverkkoon kuuluvia IP-solmuja, jotka kuuluvat samaan ATM-verkkoon
LLC	Logical Link Control, siirtokerroksen ylemmän alikerroksen määrittäminen (IEEE 802.2), joka kanavoi verkkokerroksen protokollat ja vastaa kehystämisestä
MAC	Media Access Control, siirtokerroksen alempi alikerros, joka tarjoaa osoitteiden ja siirtotielle pääsyn hallintamekanismit
MCR	Minimum Cell Rate, määrää ATM-tiedonsiirron miniminopeuden
MBS	Maximum Burst Size, määrää pusrkeen maksimikoon, joka voidaan lähettää PCR:llä noudattaen GCRA:ta
MPC	MPOA Client, looginen MPOA-komponentti, joka on osa LEC:tä ja toteuttaa asiakaspuolen MPOA-protokollassa pyytämällä MPOA-palvelua MPS:ltä
MPLS	Multi-Protocol Label Switching, kytkentäteknikka, joka perustuu otsikon käyttöön; liikenne välitetään ennalta määriteltujen yhteyk-

sien yli solmulta toiselle ilman reititystä tai IGP:n reititystauluihin keräämien tietojen pohjalta

MPOA	Multi-Protocol over ATM, ATM Forumin määrittäminen verkkokerroksen protokollien toiminnasta ATM-verkossa
MPS	MPOA Server, looginen MPOA-komponentti, joka on osa reitintä ja toteuttaa NHRP:n
MTU	Maximum Transmission Unit, tietoyksikön maksimikoko, jota voidaan käsitellä ja siirtää
NBMA	Non-Broadcast Multiple Access, monikäyttäjäverkko, joka ei tue broadcast-liikennettä tai sen toteuttaminen ei ole käyttökelpoista
NHC	Next Hop Resolution Protocol Client, LEC/MPC:n alijärjestelmä, joka panee alulle NHRP-pyynnön päästäkseen käyttämään NHRP-palvelua
NHRP	Next Hop Resolution Protocol, protokolla, jota reitittimet käyttävät verkkolaitteiden MAC-osoitteiden löytämiseen NBMA-verkossa
NHS	Next Hop Server, NHRP-protokollan määrittämä palvelin, joka ylläpitää osoitetaulua IP- ja ATM-osoitteista ATM-verkossa
NNI	Network-to-Network Interface, ATM Forumin määrittäminen kahden kytkimen välisestä rajapinnasta yksityisessä tai yleisessä verkossa
NSAP	Network Service Access Point, piste, jossa verkkokerroksen palvelu tarjotaan kuljetuskerrokselle
p2mp	point-to-multipoint, yhteys yhden lähettimen (juurisolmun) ja usean vastaanottimen (lehtisolmun) välillä

p2p	point-to-point, yhteys yhden lähettimen ja yhden vastaanottimen välillä
PCR	Peak Cell Rate, määrää ATM-tiedonsiirron maksiminopeuden
PDU	Protocol Data Unit, OSI-termi paketille eli verkkokerroksen tietoyksikölle
PGL	Peer Group Leader, vertaisverkon solmu, joka levittää tietoja oman vertaisryhmänsä solmuista muille PGL:ille ja muiden ryhmien solmuista omalle ryhmälleen
PNNI	Private Network-to-Network Interface tai Private Network Node Interface, ATM Forumin määrittäminen topologiatiedon jakamiseen kytkinten välillä ja signaalointiin p2p- ja p2mp-yhteyksien muodostamiseksi ATM-verkon yli
PT	Payload Type, määrittää sisältääkö solu käyttäjä- vai hallintatietoa, onko solun reitillä ollut ruuhkaa ja onko solu AAL5-kehiksen viimeinen solu
PTSE	PNNI Topology State Element, PNNI-tietoyksikkö, joka muiden PTSE:iden mukana kootaan PTSP:iksi ja jaetaan kaikkien vertaisverkon loogisten solmujen kesken
PTSP	PNNI Topology State Packet, PNNI-reitityksessä saavutettavuus- ja resurssitietojen vaihtoon ATM-kytkimien välillä käytetty paketti, millä varmistetaan yhteydenmuodostuspyynnön reititys kohteeseen reittiä pitkin, joka täyttää QoS-vaatimukset
PVC	Permanent Virtual Circuit, pysyvästi muodostettu yhteys, jolle on varattu tietty kaistanleveys

PVP	Permanent Virtual Path, yhden tai useamman PVC:n sisältämä pysyvästi muodostettu polku, jolle on varattu tietty kaistanleveys
QoS	Quality of Service, tiedonsiirron laadun ja saatavuuden mittari
RSVP	Resource Reservation Protocol, signalointiprotokolla resurssien varaimiseksi yksisuuntaista tiedonsiirtoa varten
RTP	Real-time Transport Protocol, UDP:hen perustuva pakettiformaatti multimedian siirtoon verkossa
SAP	Service Access Point, osoitteen lisämäärite, joka määrittää paketin lähettäjän ja vastaanottajan; piste, jossa yhden kerroksen palvelut tarjotaan seuraavalle ylemmälle kerrokselle
SAR	Segmentation and Reassembly, vastaa CS:ltä saatujen PDU:iden segmentoinnista 48-tavuisiksi hyötykuormasegmenteiksi lähetettäessä ja uudelleen kokoamisesta vastaanotettaessa
SCR	Sustainable Cell Rate, määrää ATM-tiedonsiirron keskimääräisen nopeuden
SEL	Selector, NSAP-osoitteen osa, joka erottaa verkkolaitteen SAP:t toisistaan
SMDS	Switched Multimegabit Data Service, pakettikytkentäinen WAN-tekniikka
SNAP	Subnetwork Access Protocol, LLC-otsakkeen laajennus, jota käytetään pakettien kehystämässä
SPVC	Smart Permanent Virtual Circuit, pysyvästi muodostettu (PVC) yhteys päätepisteissään, mutta kytketty (SVC) päätepisteiden välillä

SPVP	Smart Permanent Virtual Path, sisältää yhden tai useamman SPVC:n ja koostuu PVP:istä päätepisteissään ja SVP:istä muilla yhteysväleillä
SSCOP	Service Specific Connection Oriented Protocol, siirtokerroksen protokolla, joka takaa ATM-signaloinnin
SSCS	Service Specific Convergence Sublayer, palveluriippuvainen ylempi CS-alikerros, joka tarjoaa toimintavarman tiedonsiirron
SVC	Switched Virtual Circuit, dynaamisesti muodostettu ja purettu yhteys
SVP	Switched Virtual Path, dynaamisesti muodostettu ja purettu polku, joka sisältää yhden tai useamman SVC:n
ToS	Type of Service, määrää prioriteetin IP-paketille takaamatta kuitenkaan QoS:ää
TTL	Time to Live, määrää kuinka monta hyppyä IP-paketti voi kulkea
UBR	Unspecified Bit Rate, yhteyksille vain mahdollisuuksien mukaan kaistanleveyttä jakava palveluluokka
UNI	User-Network Interface, ATM Forumin määrittäminen yksityisen ja yleisen kytkimen välisestä rajapinnasta
VBR	Variable Bit Rate, reaaliaikaiseen (real time) ja ei-reaaliaikaiseen (non-real time) jaettu palveluluokka; reaaliaikaista alaluokkaa käytetään liikenteelle, joka vaatii tarkan kellotuksen, ja ei-reaaliaikaista puolestaan liikenteelle, joka ei sitä vaadi, mutta tarvitsee silti takuun palvelun laadusta

VC	Virtual Channel, looginen kanava, joka yhdistää kaksi verkkoelementtiä; voi olla joko PVC tai SVC
VCC	Virtual Channel Connection, loppukäyttäjien välinen virtuaaliyhteys, joka muodostuu yhdestä tai useammasta virtuaalikanavasta ja jolla on määrätty reitti ja päätepisteet ATM-verkossa
VCI	Virtual Channel Identifier, määrittää yhdessä VPI:n kanssa solun seuraavan määränpään sen siirtyessä kohti lopullista päämääräänsä
VLAN	Virtual LAN, looginen ryhmä eri fyysisissä LAN:eissa sijaitsevia laitteita
VP	Virtual Path, looginen ryhmä virtuaalikanavia
VPC	Virtual Path Connection, virtuaalipolkujen ristiinkytken mahdollistava virtuaalipolku
VPI	Virtual Path Identifier, määrittää yhdessä VCI:n kanssa solun seuraavan määränpään sen siirtyessä kohti lopullista päämääräänsä
VPT	Virtual Path Terminator, virtuaalikanavien ristiinkytken mahdollistava virtuaalipolku

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

ATM-tekniikkaa käytetään liityntäverkoissa ennen palveluntarjoajan runkoverkkoa ja Internet-verkkoa. Se suunniteltiin kaikenkattavaksi tekniikaksi, mutta lähiverkoissa ATM ei ole saavuttanut suurta suosiota. WAN-tekniikkana sen vahvuus oli, ja hitaammilla nopeuksilla on edelleenkin, tarkka kellotus reaaliaikaisille sovelluksille siirtämällä tietoa pienissä määrämittaisissa soluissa. ATM segmentoi paketit soluiksi lähetettäessä ja kokoaa ne uudelleen vastaanotettaessa. Segmentoinnin ansiosta tiedonsiirron säännöllisyys voidaan taata paremmin ja samalla voidaan siirtää suuria paketteja, joiden siirtäminen muuten aiheuttaisi liian suuren viiveen reaaliaikaisille sovelluksille. Tiedonsiirron nopeuden kasvu ja protokollien kehitys on johtanut MPLS:n syntyyn auttaen operaattoreita muuttamaan verkonsa täysin IP-pohjaisiksi. ATM ei näin ole käytössä loputtomiin vaan sen korvaa kustannustehokkaampi Ethernet-pohjainen vaihtoehto.

Tässä opinnäytetyössä käsitellään ATM:n ominaisuuksia vikasietoisessa laboratorioverkossa käyttäen FORE:n kytkimiä ja keskittimiä. Lähdeaineistona on käytetty Marconin (entinen FORE, nykyinen Ericsson) Suomen maahantuojaan tarjoamia oppaita. Tekniikoiden esittelyt perustuvat viimeisimmän käytettävissä olleen ForeThought-ohjelmistoversion aikaiseen tilanteeseen, mutta varsinainen konfigurointi suoritetaan vanhemmalla versiolla. Tässä on otettava huomioon myös ohjelmiston lisenssityyppi, joka voi rajoittaa tekniikoiden käyttöönottoa. Lisenssityyppien vertailu on liitteessä 1. Koska käytäntöä on pidetty teoriaa tärkeämpänä, on työssä pitäydytty yleisellä tasolla menemättä yksityiskohtiin siitäkin syystä, että tuetut standardit sisältävät vaihtoehtoisia ja toteutuksesta riippuvia osia. Tästä syystä on käytetty valmistajan omaa dokumentaatiota.

1.2 Työn tavoitteet

Opinnäytetyön teoriaosuudessa on esitelty ATM-tekniikka ja sen LAN-emulointitekniikat sekä MPLS, joka yhdistää IP-reitityksen ATM-kytkentään. Käytännön

osuudessa on tarkoitus selvittää, miten käyttöönotto tapahtuu näiden tekniikoiden osalta. Liikenteenhallintaa, joka teki ATM:stä kiinnostavan, on pidetty tärkeimpänä tutkittavana ominaisuutena. Sen testaamiseksi tarkastellaan eri liikennetyyppien vuorovaikutusta kyllästetyssä (saturated) linkissä ja kaistanleveysparametrien vaikutusta videon laatuun siirrettäessä sitä ATM-verkossa, kuinka paljon kaistanleveyttä videon virheetön siirto vaatii ja miten solujen putoaminen vaikuttaa videon laatuun. Koska samoin kuin MPLS:ssä ATM:ssä eri tavoin käsiteltävät tietovuot täytyy erottaa toisistaan, videon lukumäärä on rajoitettu kahteen tai kolmeen. Kolmen vuon yhtäaikainen käyttö vaatisi yhteensä kuusi päätelaitetta, koska jokaiselle parille on oma virtuaalikanavansa. Saman päätelaitteen liitettä ei osaa jakaa liikennettä sen tyyppin perusteella kahteen eri kanavaan. Linkin kyllästyksessä rajoittavaksi tekijäksi muodostuu käytettyjen keskittimien Ethernet-liitännöiden nopeus, joka on 100 Mbps verrattuna ATM-linkin (OC-3) 155 Mbps nopeuteen.

LAN-emulointitekniikoiden ja muiden käsiteltävien tekniikoiden testauksessa riittää yhteydenmuodostus kahden päätelaitteen välille. Ping-komentoa käytetään yhteyden toiminnan varmistamiseksi. Yhteyden aikaansaamiseksi annetut komennot kirjoitetaan näkyviin ja niiden merkitys selitetään lukijalle.

2 ASYNCHRONOUS TRANSFER MODE

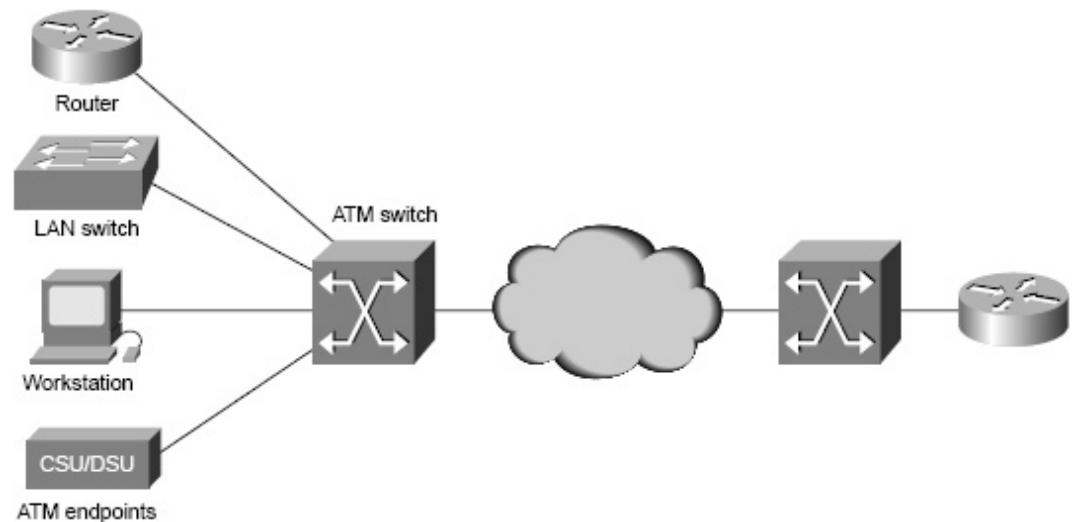
2.1 ATM-arkkitehtuuri

ATM (Asynchronous Transfer Mode) on ITU-T:n (International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector) solunvälitysstandardi, jossa tieto siirretään pienissä määrämittaisissa soluissa. ATM-verkot ovat piirikytkentäisiä eli tiedonsiirto edellyttää siihen osallistuvien laitteiden muodostamaan yhteyden toistensa välille ennen tiedonsiirtoa. ATM perustuu ITU-T:n B-ISDN-standardiin, jonka ATM Forum laajensi yksityisiin verkkoihin. ATM on kytkentä- ja kanavointitekniikka, joka yhdistää piirikytkennän taatun kapasiteetin ja muuttumattoman siirtoviiveen sekä pakettikytkennän tehokkuuden pusrkeisen liikenteen siirrossa. (Cisco 2006, 1 - 2.)

ATM on asynkroninen eli tiedonsiirto on yhteisestä kellosignaalista riippumaton, mutta tämä pätee vain siirtokerroksella, jolla ATM toimii. Fyysinen kerros on synkroninen, joten laitteet lähettävät ja vastaanottavat samanaikaisesti. (Marconi 2002a, 285.) Jotta ATM pystyisi siirtämään ääntä, videota ja dataa, on näille määritetty omat liikennetyypinsä, joilla on omat kaistanleveysparametrinsa (Marconi 2002a, 78). Kun tieto verkkokerroksen protokollalta jaetaan soluihin (SAR) ja eri liikennetyyppejä kanavoidaan, yhden käyttäjän lähettämää tietoa sisältävät solut eivät välttämättä saavu määränpäähänsä määrääjain. Tämä saapumisaikojen vaihtelu johtuu verkon ja sen laitteiden arkkitehtuurista, liikennemäärästä ja tiedonsiirtoon varatuista resursseista. Eri liikennetyypeille on omat ATM-sovituserroksensa. (FORE Systems 1998, 191.)

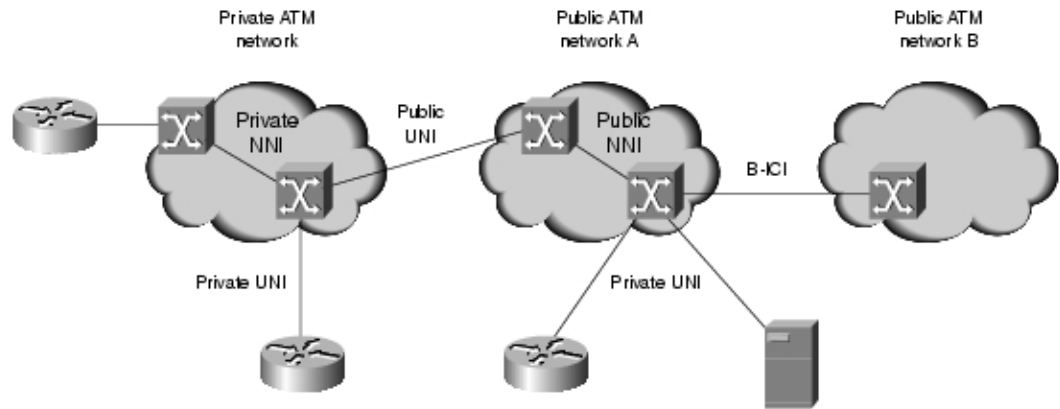
ATM-solu koostuu 53 tavusta. Ensimmäiset viisi tavua ovat otsaketietoa ja loput 48 tavua käyttäjätietoa eli varsinaista hyötykuormaa. Pienet samankokoiset solut sopivat äänen ja videon siirtoon, koska multimediasovellukset eivät siedä suurten pakettien lataamisesta aiheutuvia viiveitä. Kuviossa 1 on ATM-verkko, joka koostuu ATM-kytkimistä ja -päätelaitteista. Kytkimen tarkoitus on solujen siirtäminen päätelaitteiden välillä. Se vastaanottaa solun päätelaitteelta tai toiselta kytkimeltä tuloportissa, lukee ja päivittää solun otsaketiedon sekä kytkee solun lähtöporttiin määränpäättä kohti. Päätelaitteen, kuten työaseman, reitittimen, LAN-kytkimen tai

CSU/DSU:n, (Channel Service Unit / Data Service Unit) liittää ATM-verkkoon ATM-rajapinta. (Cisco 2006, 3.)



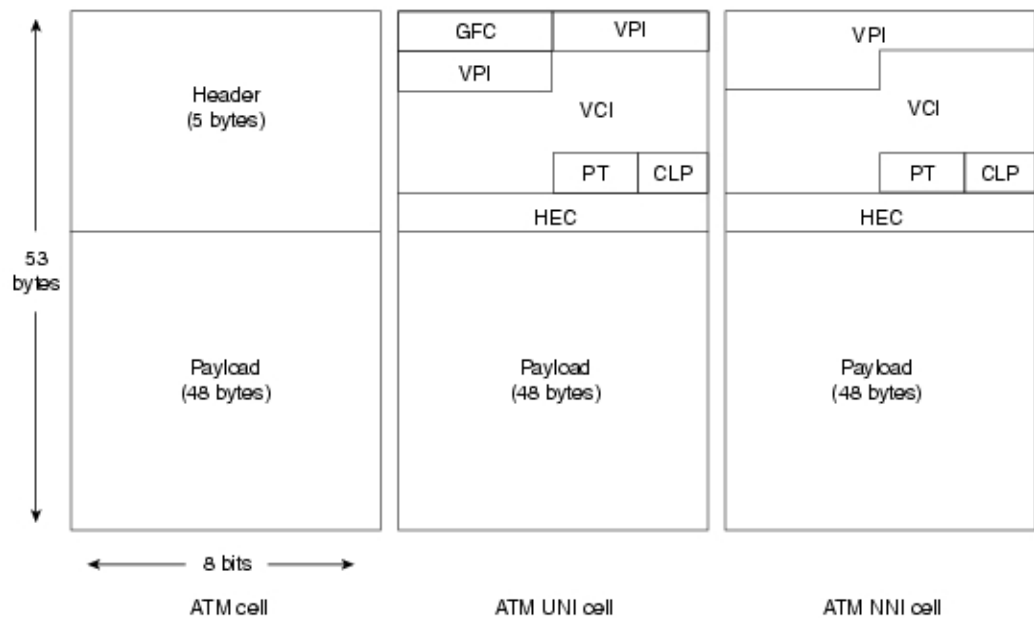
KUVIO 1. ATM-verkko koostuu ATM-kytkimistä ja -päätelaitteista (Cisco 2006, 4)

ATM-kytkimet tukevat UNI- ja NNI-rajapintoja. UNI (User-Network Interface) liittää päätelaitteen kytkimeen ja NNI (Network-to-Network Interface) liittää kytkimet toisiinsa. Rajapinnat voidaan edelleen jakaa yksityisiin ja yleisiin riippuen siitä, onko kytkin käyttäjän yksityisessä omistuksessa ja käytössä vai palveluntarjoajan asiakkaiden käytössä. Yksityinen UNI liittää päätelaitteen yksityiseen kytkimeen ja yleinen UNI päätelaitteen tai yksityisen kytkimen yleiseen kytkimeen. Yksityinen NNI liittää kaksi saman yksityisen organisaation kytkintä toisiinsa ja yleinen NNI kaksi saman yleisen organisaation kytkintä toisiinsa. B-ICI (Broadband Inter-Carrier Interface) puolestaan liittää kaksi eri palveluntarjoajan yleistä kytkintä toisiinsa. (Cisco 2006, 4.) Kuviossa 2 yleisen ATM-verkon A toisen kytkimen kaksi rajapintaa ovat yksityisiä, vaikka kytkin onkin yleinen. Yksityisyydellä tai yleisyydellä ei kuitenkaan ole merkitystä rajapinnan konfiguroinnissa.



KUVIO 2. ATM-rajapinnat (Cisco 2006, 5)

ATM-solun otsaketieto voi myös olla UNI- tai NNI-tyyppinen. UNI-otsaketta käytetään tiedonsiirrossa päätelaitteiden ja kytkinten välillä ja NNI-otsaketta kytkinten välillä. Kuvion 3 NNI-otsaketyyppi sisältää GFC-kentän (Generic Flow Control) sijasta pidemmän VPI-kentän (Virtual Path Identifier), joka mahdollistaa suuremman määrän runkoyhteyksiä kytkinten välillä. Hyötykuorman koko on sama 48 tavua. (Cisco 2006, 5.)

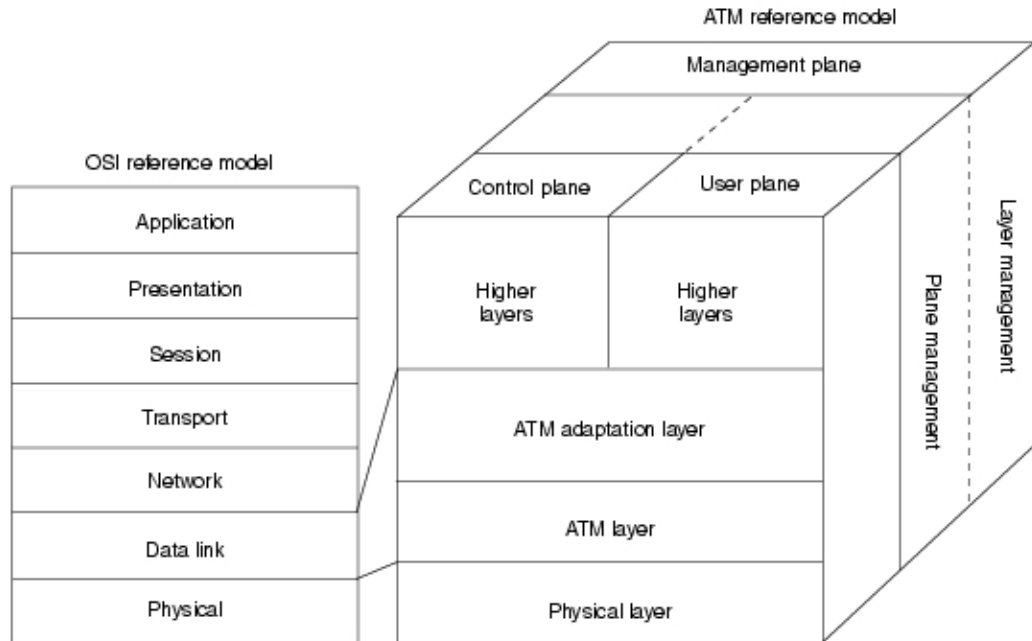


KUVIO 3. ATM-solun otsaketyypit (Cisco 2006, 5)

ATM-yhteys on joko PVC- (Permanent Virtual Circuit) tai SVC-tyyppinen (Switched Virtual Circuit). PVC täytyy konfiguroida käsin eikä se tarjoa vikasietoisuutta. Toisaalta kytkimien ei tarvitse muodostaa VPC:tä sen ollessa staattisesti määritetty ennen kuin tiedonsiirto voi alkaa. SVC on dynaamisesti muodostettu ja purettu yhteys ja se on käytössä vain tiedonsiirron ajan. Se vaatii signaalointiprotokollan, joka toisaalta automatisoi yhteydenhallinnan, mutta yhteydenmuodostus vie aikaa ja kuluttaa resursseja. (Cisco 2006, 6.)

ATM-arkkitehtuurin toiminnan kuvaamiseen käytetään loogista viitemallia, jota on verrattu OSI-viitemalliin kuviossa 4. ATM vastaa OSI-viitemallin fyysistä kerrosta ja osaa siirtokerroksesta. ATM-viitemalli muodostuu hallinta-, käyttäjä- ja hallintotasosta, jotka käsittävät kaikki kerrokset. Hallintataso (control plane) luo ja hallinnoi signaalointipyynnöt, käyttäjätaso (user plane) hallinnoi tiedonsiirron ja hallintataso (management plane) sisältää kaksi komponenttia, joista kerroshallinto (layer management) hallinnoi kerroskohtaiset toiminnot, kuten virheiden ja protokollaongelmien havaitsemisen, ja tasohallinto (plane management) hallinnoi ja yhdistää koko järjestelmää koskevat toiminnot. ATM-viitemalli koostuu fyysisestä kerroksesta, ATM-kerroksesta ja AAL:stä (ATM Adaptation Layer).

- Fyysinen kerros on yhdenmukainen OSI-viitemallin fyysisen kerroksen kanssa. Se hallinnoi siirtotiestä riippuvaista tiedonsiirtoa.
- ATM-kerros vastaa kanavoinnista ja solunvälityksestä. Se vastaa yhdessä AAL:n kanssa OSI-viitemallin siirtokerrosta.
- ATM-sovituseros eli AAL muuttaa ATM:n läpinäkyväksi ylempien kerrosten protokollien näkökulmasta. Se vastaa käyttäjätiedon esikäsittelystä ja segmentoinnista. (Cisco 2006, 7.)



KUVIO 4. OSI- ja ATM-viitemalli (Cisco 2006, 8)

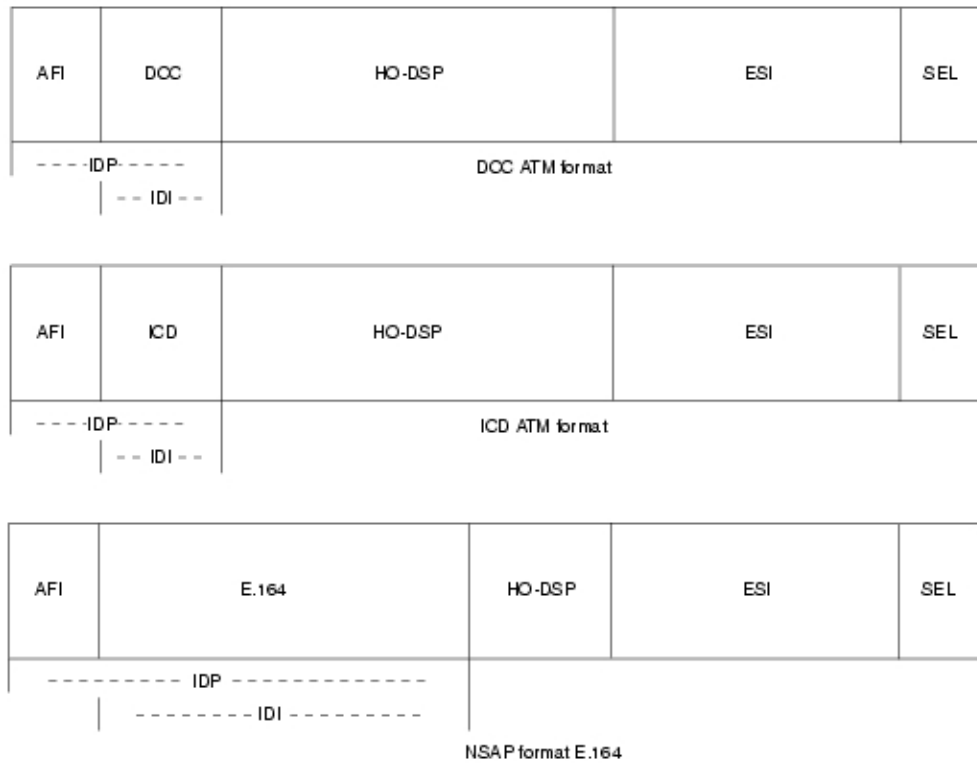
Fyysisellä kerroksella solut muutetaan bittivirraksi, hallitaan bittien lähetystä ja vastaanottoa fyysisellä siirtotiellä, seurataan solurajoja ja pakataan solut sopiviin kehyksiin tiedonsiirtoa varten. Fyysinen kerros on jaettu kahteen alikerrokseen. PMD-alikerros (physical medium-dependent sublayer) synkronoi lähetyksen ja vastaanoton lähettämällä ja vastaanottamalla synkronista bittivirtaa sekä määrittää fyysisen siirtotien. TC-alikerros (transmission convergence sublayer) valvoo solurajoja mahdollistaen laitteiden löytää solut bittivirrasta, laskee ja tarkistaa tarkistussummat taaten tiedon oikeellisuuden, valvoo synkronointia lisäämällä ja poistamalla täytesoluja sovittaen hyötykuorman siirtonopeuden siirtotien kapasiteettiin ja pakkaa solut siirtotien hyväksymiin kehyksiin. (Cisco 2006, 8.)

ATM-kerros on siirtokerroksen palveluriippumaton alempi alikerros. Se vastaanottaa 48-tavuiset hyötykuormasegmentit ATM-sovituserrokselta ja liittää niihin 5-bittisen otsakkeen muodostaen 53-tavuisia ATM-soluja. (Cisco 2001, 23.)

ATM-kerros selvittää verkkokerroksen osoitteista ATM-osoitteet, joiden formaatti perustuu ISO:n (International Organization for Standardization) määrittämään NSAP-osoitteeseen (Network Service Access Point). Koska osoitteet eroavat toi-

sistaan verkko- ja ATM-kerroksella, ATM käyttää ATM ARP:tä (ATM Address Resolution Protocol) selvittämään osoitteet. Kolme osoiteformaattia on määritetty: DCC (Data Country Code), ICD (International Code Designator) ja yleisissä B-ISDN-verkoissa E.164, joista kuviossa 5 on E.164-osoitteesta koodattu NSAP-osoite. Osoitteet koostuvat AFI:stä (Authority and Format Identifier), IDI:stä (Initial Domain Identifier) ja DSP:stä (Domain Specific Part). IDP (Initial Domain Part) sisältää AFI:n ja IDI:n DCC- ja ICD-osoitteissa ja routing domain -tunnisteen edellisten lisäksi E.164-osoitteesta koodatussa NSAP-osoitteessa. DSP (Domain Specific Part) sisältää area-tunnisteen, ESI:n ja SEL:n.

- AFI tunnistaa osoiteformaatin.
- DCC tunnistaa valtion.
- ICD tunnistaa kansainvälisen organisaation.
- E.164 sisältää E.164-numeron.
- HO-DSP (High Order Domain Specific Part) yhdistää reititysalue- (routing domain) ja aluetunnisteen (area).
- ESI (End System Identifier) tunnistaa IEEE:n määrittämän MAC-osoitteen.
- SEL (Selector) tunnistaa laitteen prosessin, johon halutaan saada yhteys. SEL:ää käytetään paikallisessa kanavoinnissa päätelaitteessa eikä sillä ole merkitystä reitityksessä. (Cisco 2006, 10 - 12.)



KUVIO 5. ATM-osoiteformaatit (Cisco 2006, 12)

AAL on siirtokerroksen palveluriippuvainen ylempi alikerros, joka edelleen koostuu kahdesta alikerroksesta, konvergenssi- (CS) ja SAR-alikerroksesta. Se vastaanottaa tietoa sovelluksilta ja esittää sen ATM-kerrokselle 48-tavuisina hyötykuormasegmentteinä. (Cisco 2001, 5.) ATM-sovituserroksia on neljä: AAL1, AAL2, AAL3/4 ja AAL5. AAL1 on yhteydellinen palvelu, joka sopii käsittelemään CBR-lähteitä (Constant Bit Rate), kuten ääntä ja videota. Se edellyttää lähteen ja kohteen synkronointia. Myös VBR-liikenne (Variable Bit Rate), kuten paketoitu ääni tai video, edellyttää synkronointia, mutta purskeisuudestaan johtuen sille on oma AAL2-sovituserroksensa, joka sopii palveluille, joiden tiedonsiirtonopeus ei ole vakio, mutta joilla on samanlaiset vaatimukset kuin CBR-palveluilla. AAL2 tukee sekä reaaliaikaista rtVBR- (real time Variable Bit Rate) että ei-reaaliaikaista nrtVBR-liikennettä (non-real time Variable Bit Rate). Se varaa neljä tavua hyötykuormasta käyttöönsä. AAL3/4 tukee sekä piiri- että pakettikytkentäistä palvelua. Sitä käytetään ATM-verkossa SMDS-pakettien (Switched Multimegabit Data Service) siirtoon. AAL5 on ensisijainen palvelu sekä piiri- että paketti-

kytkentäiselle datalle. Sitä käytetään CLIP- (Classical IP) ja LANE-liikenteelle (LAN Emulation). (Cisco 2006, 9 - 10.)

2.2 Virtuaalipolut (Virtual Paths)

ATM-yhteydet koostuvat virtuaalipoluista, jotka tunnustetaan VPI:stä, ja virtuaalikanavista, jotka tunnustetaan VPI/VCI-parista (Virtual Path Identifier/Virtual Channel Identifier) (Cisco 2006, 6). VPI- ja VCI-tunnisteilla on vain paikallista merkitystä ja ne voivat muuttua joka linkillä (Marconi 2002a, 41). Virtuaalipolkuja käytetään kahden verkkosolmun yhdistämisessä. Niitä voi olla useita yhdellä fyysisellä linkillä kuten kuviossa 6 on esitetty. Virtuaalipolkuja on kahta tyyppiä: VPC:itä (Virtual Path Connection) ja VPT:itä (Virtual Path Terminator). VPC:t mahdollistavat virtuaalipolkujen ja VPT:t virtuaalikanavien ristiinkytken. Yksi virtuaalipolku voi sisältää useita virtuaalikanavia. Kaikilla soluilla on sama VCI virtuaalipolkuun sisään mennessä kuin sieltä ulos tullessakin. Virtuaalipolut koostuvat VPT:istä alku- ja loppupäässä sekä yhdestä tai useammasta VPC:stä, jos polku kulkee matkalla muiden kytkimien kautta. (Marconi 2002a, 43 - 44.)

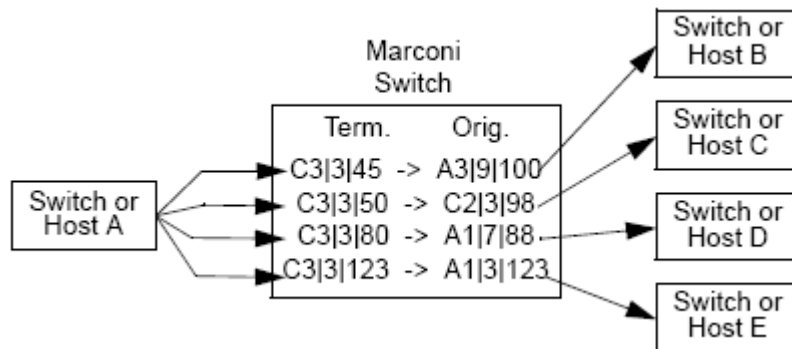


KUVIO 6. Fyysinen linkki, virtuaalipolut ja -kanavat (Cisco 2006, 7)

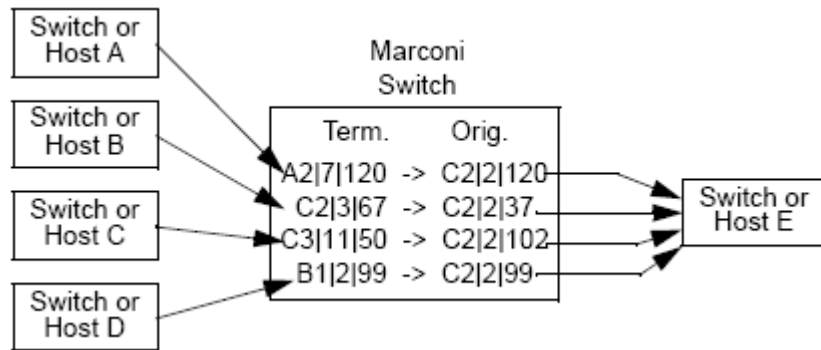
VPC:t reitittävät virtuaalipolut kytkinmatriisin läpi. Kun solu vastaanotetaan, sen VPI tutkitaan, jonka perusteella selvitetään lähtöportti ja lähtö-VPI. Kaikki virtuaalikanavat VPC:n sisällä kytketään muuttamatta solujen VCI:tä. Koska VPC:t ovat yksisuuntaisia, kaksi VPC:tä tarvitaan kaksisuuntaiseen tiedonsiirtoon. (Marconi 2002a, 45.) VPT:t toimivat virtuaalipolkujen alku- ja loppupisteinä. Ne määritetään lähtöporttina ja lähtö-VPI:nä (originating path) tai tuloporttina ja tulo-VPI:nä (terminating path). Koska VPT:t eivät määritä solutason kytkentää, virtu-

aalikanavien tulee olla olemassa solujen kytkemiseksi tulosta lähtöön. VPT:itä käytetään pääasiassa kaistanleveyden jakoon. (Marconi 2002a, 46.)

Virtuaalikanava yhdessä virtuaalipolun kanssa määrittää virtuaaliyhteyden. Kyt-kinmatriisissa virtuaalikanava kytkee vastaanotetut solut yhdestä portista tietyillä VPI- ja VCI-arvoilla toiseen porttiin uusilla VPI- ja VCI-arvoilla. Virtuaalikanavat määrittävät yhden virtuaaliyhteyden kahden pisteen välillä. Kuten VPC:tkin, virtuaalikanavat ovat yksisuuntaisia. Kaksisuuntaiseen tiedonsiirtoon kahden por- tin välillä kytkinmatriisissa tarvitaan kaksi virtuaalikanavaa. Ennen kuin virtuaali-kanava voidaan luoda, täytyy sitä vastaavat VPT:t olla jo olemassa. Kuviossa 7 neljä virtuaalikanavaa on kytketty portista C3 ja VPI:stä 3 kolmeen eri porttiin ja neljään eri VPI:hin. Lähtö-VPI 3 on kuviossa 7 kahdessa eri portissa. Virtuaalipo- lut VPT:issä A1|3 ja C2|3 ovat erillisiä, koska ne ovat eri linkeissä. Kuviossa 8 neljä virtuaalikanavaa on kytketty porttiin C2|2. (Marconi 2002a, 52 - 53.)

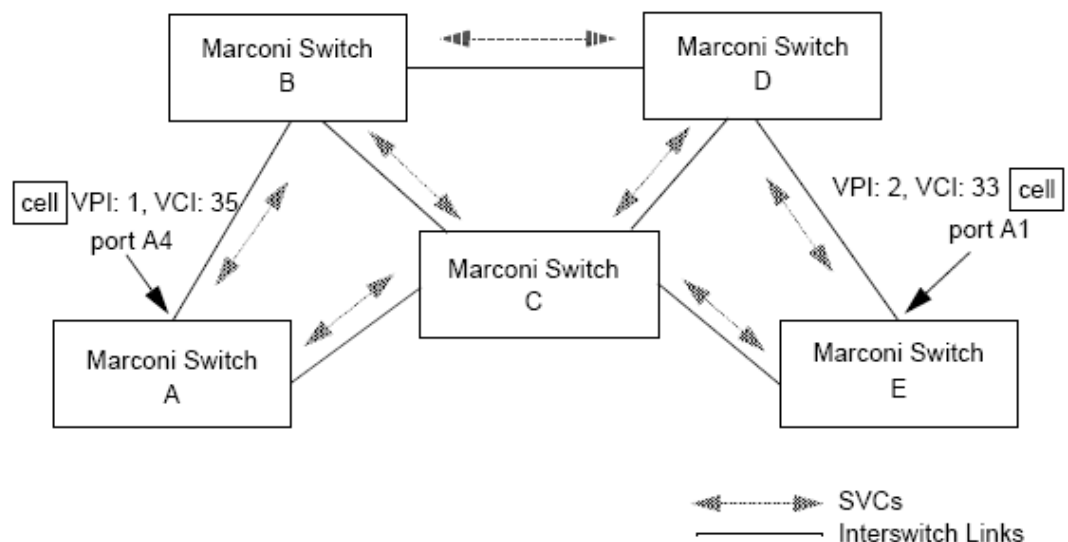


KUVIO 7. Virtuaalikanavien luonti VPT:stä C3|3 (terminating path) (Marconi 2002a, 53)



KUVIO 8. Virtuaalikanavien luonti VPT:hen C2|2 (originating path) (Marconi 2002a, 53)

SPVC:t (Smart Permanent Virtual Circuit) muodostetaan signaloinnilla tarvittaessa. Toisin kuin PVC:t ne kestävät vain tiedonsiirron ajan. (Marconi 2002a, 54.) PVC:illä tarkoitetaan yhteydellä olevia VPC:itä ja VPT:itä. SPVC:t ja PVC:t käyttävät molemmat virtuaalikanavia, mutta ne konfiguroidaan eri tavoin. Jos linkki menee alas, myös sen yli kulkeva PVC menee alas. Jos kyseessä on SPVC ja on olemassa vaihtoehtoinen reitti, päätekytkinmatriisit alkavat automaattisesti käyttää sitä. Kuviossa 9 minkä tahansa yhden linkin kaatuminen ei estä tiedonsiirtoa kytkimien A ja E välillä. (Marconi 2002a, 54.)



KUVIO 9. Solun reitti SPVC:itä pitkin (Marconi 2002a, 54)

Kaistanleveyden ylivaraaminen mahdollistaa polkujen tai kanavien lisäämisen yli linkin tai polun kapasiteetin. Jos yhteydet käyttävät vähemmän kaistanleveyttä kuin on pyydetty, niitä voidaan hyväksyä enemmän palvelun laadun siitä kärsimättä. VBR-ylivaraus käyttää kaistanleveyden ja puskurin ylivarausta rtVBR- ja nrtVBR-liikenteelle. VP:n kaistanleveyden ylivaraus on kääntäen verrannollinen sen sisältämien yhteyksien kaistanleveyteen. Jos VP:n kapasiteetti kerrotaan kahdella, jokaisen sen sisältämän yhteyden kapasiteetti jaetaan kahdella. Ilman ylivarausta CAC (Connection Admission Control) ei hyväksyisi yhteyksiä yli VP:n 100 % kapasiteetin. Puskurin ylivaraus mahdollistaa nopeamman liikennöinnin puskurista kuin normaalisti. (Marconi 2002a, 74.)

QoS (Quality of Service) perustuu virtuaaliyhteyden kaistanleveysparametreihin, liikennetyyppiin ja AAL:ään. Määritetyt liikennetyypit (palveluluokat) ovat CBR, rtVBR, nrtVBR, ABR ja UBR. CAC vastaa eri liikennetyyppien sujuvasta rinnakkaiselosta.

- Yhteyden luontivaiheessa CBR-liikenteelle (Constant Bit Rate), kuten äänelle, määritetään PCR (Peak Cell Rate), jonka ATM-verkon täytyy pystyä takaamaan yhteyden ajaksi.
- rtVBR- (real time Variable Bit Rate) ja nrtVBR-liikenteelle (non-real time Variable Bit Rate), kuten videolle ja datalle, määritetään PCR, SCR (Sustainable Cell Rate) ja MBS (Maximum Burst Size), jotka ATM-verkon täytyy pystyä takaamaan yhteyden ajaksi.
- ABR-liikenteelle (Available Bit Rate) määritetään PCR ja MCR (Minimum Cell Rate), joista MCR:n ATM-verkon täytyy pystyä takaamaan yhteyden ajaksi. ABR-liikennelähteet säätelevät lähetysnopeuttaan verkon ruuhkaisuuden mukaan.
- UBR-liikenteelle (Unspecified Bit Rate), kuten yleislähetyksille (broadcast), verkko ei anna kaistanleveydestä. (Marconi 2002a, 78.)

Liikenteenvalvonnalla (UPC) varmistetaan, että solut noudattavat tehtyjä liikennesopimuksia. Solut, jotka eivät noudata sopimustaan, joko merkitään tai hylätään riippuen sopimuksesta. Tällä varmistetaan, ettei varattua kaistanleveyttä ylitetä.

UPC käyttää GCRA:ta, joka on ”vuotava ämpäri” (leaky bucket). Se on algoritmi, joka mittaa seuraavia parametreja:

- tiedonsiirron maksiminopeutta (PCR),
- solujen saapumisajan vaihtelun toleranssia (CDVT),
- keskimääräistä tiedonsiirtonopeutta (SCR),
- pursketoleranssia (BT) ja
- tiedonsiirron miniminopeutta (MCR).

Algoritmi mittaa, saapuvatko solut etuajassa, ajallaan vai myöhässä. Jos solu on etuajassa, se merkitään tai hylätään, koska se ylittää sallitun nopeuden. Muussa tapauksessa solu päästetään läpi muuttumattomana. Ensimmäinen ämpäri mittaa, kuinka nopeasti se tyhjenee (PCR), ja kuinka syvä se on (CDVT). Toisen ämpäriin vastaavat parametrit ovat SCR tyhjenemisnopeudelle ja BT syvyydelle. (Marconi 2002a, 79.) Jokaisella ATM-solulla on CLP-bitti, joka määrittää solun prioriteetin. Jos CLP-bitti on asetettu arvoon 1, solu on alempiarvoinen. Verkon ruuhkautuessa alempiarvoiset solut hylätään ennen vakuutettuja (CLP=0) soluja. Taulukossa 1 on liikennesopimuksien muuttujat ja liikenteenvalvonnan toiminnot. Sopimukset koostuvat

- liikennetyypistä (CBR, rtVBR, nrtVBR, ABR tai UBR),
- liikenteenvalvontaskeemasta (Policing Scheme) ja
- muuttujista (PCR, SCR, MBS, BT ja CDVT).

TAULUKKO 1. Liikennesopimukset (Marconi 2002a, 80)

Policing Scheme	PCR	SCR	MBS	Bucket 1	Bucket 2	Policing on Switch Fabric	Action on non-conforming cells	
							Bucket 1	Bucket 2
CBR	PCR01			PCR01, CDVT		Yes	Drop CLP=0+1	
CBR0	PCR0, PCR01			PCR01, CDVT	PCR0, CDVT	Yes	Drop CLP=0+1	Drop CLP=0
CBR0TAG	PCR0, PCR01			PCR01, CDVT	PCR0, CDVT	Yes	Drop CLP=0+1	Tag CLP=0 (change bit to CLP=1)
VBR1	PCR01	SCR01	MBS01	PCR01, CDVT	SCR01, BT01+CDVT	Yes	Drop CLP=0+1	Drop CLP=0+1
VBR2	PCR01	SCR0	MBS0	PCR01, CDVT	SCR0, BT0+CDVT	Yes	Drop CLP=0+1	Drop CLP=0
VBR3	PCR01	SCR0	MBS0	PCR01, CDVT	SCR0, BT0+CDVT	Yes	Drop CLP=0+1	Tag CLP=0 (change bit to CLP=1)
ABR1	PCR01			PCR01, CDVT		Yes	Drop CLP=0+1	
UBR1	PCR01			PCR01, CDVT		Yes	Drop CLP=0+1	
UBR2	PCR01			PCR01, CDVT		Yes	Tag CLP=0+1	

CBR-skeema käyttää vain ensimmäistä ämpäriä kokonaisvuon tarkasteluun. Jos solu ylittää maksiminopeuden tai CDVT:n maksimi-arvon, se hylätään riippumatta sen prioriteetista. CDVT on PCR:n käänteisarvon vaihtelun maksimi-arvo. Kaksi muuta CBR-skeemaa käyttävät toista ämpäriä testatakseen vakuutetut solut. Jos solu ei läpäise testejä, se hylätään (CBR0) tai merkitään vakuuttamattomaksi (CBR0TAG). VBR-skeemat ovat rtVBR- ja nrtVBR-liikenteelle. Niiden ensimmäiset ämpärit toimivat samaan tapaan kuin CBR-skeemassa. VBR1:n toinen ämpäri tarkastaa SCR:n ja BT:n kokonaisvirrasta. BT voidaan laskea, kun tunnetaan PCR, SCR ja MBS. CDVT koskee nyt SCR:ää. Solu hylätään viimeistään toisessa ämpärisä, jos se ei läpäise ämpäriin testejä. VBR2:n ja VBR3:n toisessa ämpärisä testataan vain vakuutetut solut. Jos solu ei läpäise testejä, se hylätään (VBR2) tai merkitään vakuuttamattomaksi (VBR3). ABR-skeemassa MCR voidaan asettaa arvoon 0, jolloin miniminopeudelle ei anneta takuuta. Verkon ruuhkatilanteissa taatun miniminopeuden ylittävät solut voidaan hylätä. UBR-skeemoissa solut joko hylätään tai merkitään vakuuttamattomiksi. Jos PCR:ää ei ole määritetty, liikennesopimukset

nettä ei valvota (UBR1) tai liikenteen kaikki solut merkitään (UBR2). (Marconi 2002a, 80 - 82.)

UBR-liikenteelle voidaan määrittää useita puskureita ja niille UBRbcs (UBR Behavior Class Selector). Tämä mahdollistaa UBR-yhteyksien priorisoinnin. IP:n CoS (Class of Service) voidaan säilyttää liikenteessä, joka ei vaadi QoS:ää ATM-verkossa. Mitä suurempi BCS-arvo puskurilla on, sitä korkeampi on puskuria käyttävän UBR-yhteyden prioriteetti. (Marconi 2002a, 86.)

2.3 Classical IP (CLIP)

CLIP on malli, jossa ATM-tekniikkaa käytetään perinteisessä LAN-ympäristössä käyttäen pysyviä (PVC) ja/tai kytkettyjä (SVC) virtuaaliyhteyksiä. SVC-signaaliointi suoritetaan UNI-määrittelyn (User-Network Interface) mukaisesti, joka perustuu Q.2931-määrittelyyn. Q.2931 on määrittely yhteyksien luonnille, ylläpitämiselle ja purkamiselle dynaamisesti B-ISDN UNI:ssä ja se käyttää SSCOP:tä (Service Specific Connection Oriented Protocol) luotettavana tiedonsiirtoprotokollana. Signaaliointi tapahtuu VPI:ssä 0 ja VCI:ssä 5. Q.2931-yhteydet ovat kaksisuuntaisia, joten samaa VPI/VCI-paria käytetään sekä lähetettäessä että vastaanotettaessa. IP-paketit kehystetään käyttäen LLC/SNAP:tä ja segmentoidaan ATM-soluihin käyttäen AAL5:ttä. MTU:n oletusarvo on 9180 tavua, johon LLC/SNAP lisää 8 tavua. Paketin maksimikoko on 65535 tavua. CLIP ei tue broadcast- tai multicast-liikennettä. (Marconi 2002a, 91.)

Tärkeä käsite CLIP:ssä on LIS:t (Logical IP Subnet), jotka voidaan rinnastaa perinteisiin IP-aliverkkoihin. Liikennöinti kahden LIS:n välillä tapahtuu verkon laitteen kautta, joka kuuluu kumpaankin LIS:ään. Jokainen LIS-jäsenyys on erillisen CLIP-rajapinnan kautta, jolla on omat osoitteensa. Laitteen on tiedettävä fyysisen rajapinnan NSAP-osoite ennen kuin yhteydet sen yli ovat mahdollisia. ILMI:n (Interim Local Management Interface) päätarkoitus on löytää ja rekisteröidä nämä osoitteet dynaamisesti. NSAP-osoite koostuu 13-tavuisesta verkkoprefiksistä, joka on kytkimen verkkoprefiksi, johon päätelaite on liittynyt; 7-tavuisesta käyttäjäosasta, joka koostuu 6-tavuisesta ESI:stä (End System Identifier), joka on verkko-

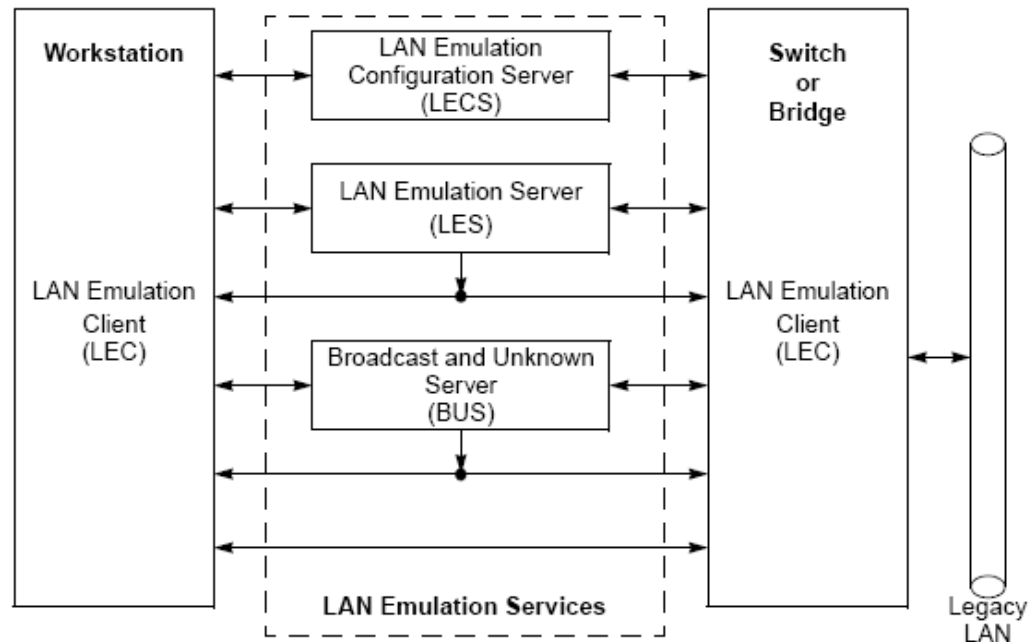
rajapinnan MAC-osoite; ja 1-tavuisesta valitsimesta, joka erottaa CLIP-rajapinnat fyysisessä rajapinnassa. Jos ILMI on tuettu verkon kaikissa kytkimissä ja päätelaitteissa, se mahdollistaa kytkimen löytää itseensä liittyneet laitteet. Kytkin lähettää verkkoprefiksinsä ja saa takaisin osoitteet, joihin on liitetty ESI:t ja valitsinkentät. Rekisteröinti liikenne tapahtuu AAL5:n yli VPI:ssä 0 ja VCI:ssä 16. Rekisteröinnin jälkeen tiedonsiirto voi alkaa. Jos verkon laite ei tue ILMI:tä, verkkoprefiksi täytyy konfiguroida käsin. (Marconi 2002a, 92 - 95.)

ATM ARP:tä käytetään ATM-osoitteen selvittämiseen, kun tiedetään vastaava IP-osoite. ATM ARP käyttää ARP-palvelinta, koska yleislähetystä ei tueta. Jokaisella LIS:illä voi olla vain yksi ARP-palvelin, mutta sama palvelin voi palvella useampaa LIS:ää, ja jokaiseen päätelaitteeseen LIS:ssä täytyy konfiguroida ARP-palvelimen ATM-osoite. (Marconi 2002a, 96.) Kun päätelaite tietää oman ja ARP-palvelimen ATM-osoitteen, se muodostaa yhteyden ARP-palvelimeen. Yhteyden muodostamisen jälkeen palvelin lähettää päätelaitteelle InARP-pyyynnön (Inverse ARP) oppiakseen sen IP-osoitteen. Kun vastaus on saatu, palvelimella on tiedossa sekä päätelaitteen ATM-osoite että sen IP-osoite. Näin ARP-palvelin pystyy vastaamaan, kun yhden päätelaitteen täytyy selvittää toisen päätelaitteen ATM-osoite. Vanhentuneet osoitetiedot poistetaan määrääjain. (Marconi 2002a, 98.) Jos päätelaite ei tue CLIP:tä, voidaan käyttää staattisia ARP-kirjauksia (Marconi 2002a, 99). Jos päätelaite ei tue UNI:tä, täytyy käyttää CLIP PVC:itä, koska SVC:itä ei voida muodostaa (Marconi 2002a, 100).

2.4 Emulated LAN (ELAN) ja LAN Emulation (LANE)

ELAN emuloi perinteistä LAN:ia ATM-verkossa. Useampi LAN voi toimia samanaikaisesti ja itsenäisesti ATM-verkossa. Kuvion 10 ELAN koostuu LEC:istä (LAN Emulation Client), LECS:stä (LAN Emulation Configuration Server) ja ainakin yhdestä LES/BUS-parista (LAN Emulation Server/Broadcast and Unknown Server). Ohjelmallinen lisäominaisuus on DLE (Distributed LAN Emulation), joka mahdollistaa kuorman jakamisen ja vikasietoisuuden. Sekä Ethernet- (IEEE 802.3) että Token Ring -LAN:eja (IEEE 802.5) voidaan emuloida. (Marconi 2002a, 105.) LEC kommunikoidessaan muiden komponenttien kanssa välittää tie-

toa ja selvittää osoitteita muiden hallintatoimintojen lisäksi. Se tarjoaa emuloidut MAC-kerroksen palvelut. LEC:n täytyy rekisteröityä sekä LES:n että BUS:n kanssa siinä ELAN:ssa, johon se haluaa liittyä. Jos verkon laite haluaa liittyä useampaan ELAN:iin, sillä täytyy olla useampi LEC. LECS tarjoaa tietoa ELAN:eista, joihin LEC voi liittyä, kuten jokaisen ELAN:n LES:n osoitteen. LES selvittää ATM-osoitteet MAC-osoitteista. LEC rekisteröi oman osoitteen LES:iin ja kysyy siltä MAC-osoitetta vastaavaa ATM-osoitetta tarvittaessa. BUS vastaanottaa broadcast-, multicast- ja tuntematonta unicast-liikennettä p2p-yhteyksien yli ja välittää sitä kaikille ELAN:n jäsenille p2mp-yhteyden yli. Jos BUS sijaitsee samassa laitteessa kuin LES, sen on mahdollista käyttää LES:n rekisteröintitaulua, mikä mahdollistaa unicast-liikenteen ohjaamisen ja vähentää broadcast-liikennettä, jos kohdeosoite löytyy taulusta. (Marconi 2002a, 107.) Koska AAL5 ei tue kanavointia, pakettien täytyy saapua perille järjestyksessä. Näin ollen p2mp-yhteydet voivat olla vain yksisuuntaisia. Juurisolmut voivat lähettää lehtisolmuille, mutta lehtisolmut eivät voi lähettää juurisolmulle tai muille lehtisolmuille saman yhteyden yli. Jos lehtisolmu lähettäisi paketin, se sekoittuisi juurisolmussa ja muissa lehtisolmuissa juurisolmun lähettämiin paketteihin eikä pakettien uudelleen kokoaminen olisi mahdollista. Solut kopioidaan kytkimissä yhteyden jakautuessa kahteen tai useampaan haaraan. (Cisco 2006, 13.)



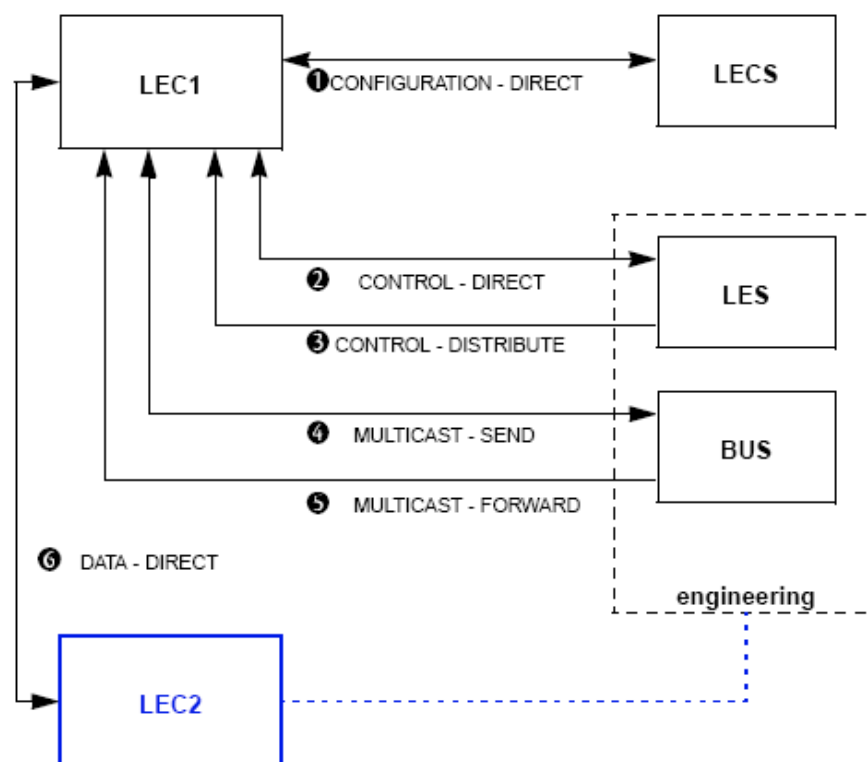
KUVIO 10. Perus-ELAN (Marconi 2002a, 106)

ELAN-komponentit kommunikoivat ATM-yhteyksien yli. LEC:t ylläpitävät erillisiä yhteyksiä liikenteenhallinnalle ja tiedonsiirrolle. LEC käyttää seuraavia yhteystyyppisiä toimiessaan ELAN:ssa.

- Suora konfiguraatioyhteys (Configuration-Direct Connection) on LEC:n luoma väliaikainen kaksisuuntainen p2p-VCC LECS:ään.
- Suora hallintayhteys (Control-Direct Connection) on LEC:n luoma kaksisuuntainen p2p-VCC LES:ään. Tätä yhteyttä on ylläpidettävä LEC:n ELAN:ssa mukanaolon ajan.
- Jaettu hallintayhteys (Control-Distribute Connection) on LES:n luoma yksisuuntainen p2mp-VCC LEC:ihin. Tätä yhteyttä on ylläpidettävä LEC:n ELAN:ssa mukanaolon ajan.
- Multicast-lähetysyhteys (Multicast-Send Connection) on LEC:n luoma kaksisuuntainen p2p-VCC BUS:ään multicast-liikennettä varten. LEC:n on yritettävä ylläpitää tätä yhteyttä sen ELAN:ssa mukanaolon ajan.
- Multicast-välitysyhteys (Multicast-Forward Connection) on yksisuuntainen p2mp-VCC BUS:stä ELAN:n LEC:ihin. LEC:n on yritettävä ylläpitää tätä yhteyttä sen ELAN:ssa mukanaolon ajan.

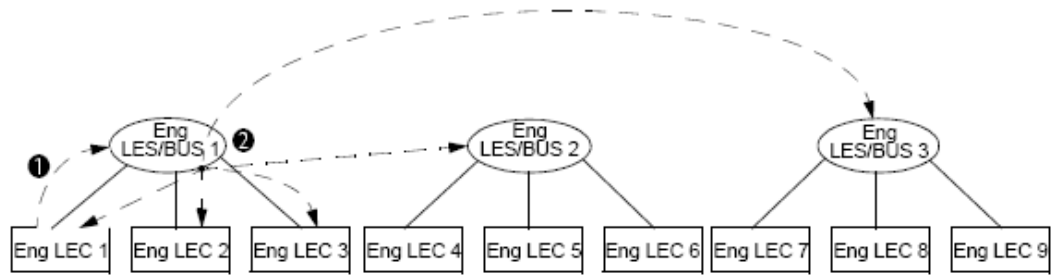
- Suora tiedonsiirtoyhteys (Data-Direct Connection) on kaksisuuntainen p2p-VCC kahden LEC:n välillä, jotka haluavat vaihtaa unicast-liikennettä. (Marconi 2002a, 108.)

Ensin LEC1 kuviossa 11 selvittää oman ATM-osoitteensa ILMI:n kautta, jos osoitetta ei ole käsin konfiguroitu. LECS:n osoitteen LEC1 saa tietoonsa kysymällä sitä kytkimeltä, johon se on liittynyt ILMI:n kautta, ottamalla yhteyden LANE:ssa määritettyyn osoitteeseen, käyttämällä tunnettua PVC:tä (VPI=0, VCI=17) tai käyttämällä paikallisesti konfiguroitua osoitetta. Kun osoitteet ovat tiedossa, LEC1 muodostaa suoran konfiguraatioyhteyden (1) LECS:ään. LECS antaa tarvittavat tiedot ELAN:sta, johon LEC1 haluaa liittyä, kuten LES:n osoitteen, emuloidun LAN:n tyyppin, MTU:n ja ELAN:n nimen, joka tässä tapauksessa on ”engineering”. Kun LEC1 tietää LES:n osoitteen, se muodostaa suoran hallintayhteyden (2) siihen. LES antaa LEC1:lle uniikin tunnisteen ja LEC1 rekisteröi MAC- ja ATM-osoitteensa. LES ylläpitää taulua kaikkien ELAN:n jäsenten osoitteista. Tässä kohtaa LEC1 on liittynyt ELAN:iin. LES muodostaa jaetun hallintayhteyden (3) takaisin LEC1:een. LEC1 voi nyt käyttää yhteyksiä 2 ja 3 LANE ARP -pyyntöjen lähettämiseen ja -vastausten vastaanottamiseen. Se lähettää pyynnön saadakseen BUS:n ATM-osoitteen, joka vastaa MAC-osoitetta FF-FF-FF-FF-FF-FF (broadcast-osoite), minkä jälkeen LEC1 muodostaa multicast-lähetysyhteyden (4) BUS:ään ja BUS multicast-välitysyhteyden (5) takaisin LEC1:een. Tässä kohtaa LEC1 on valmis tiedonsiirtoon. Koska LEC1 ei tiedä LEC2:n ATM-osoitetta, se lähettää LANE ARP -pyynnön LES:lle. Katkoviiva LEC2:n ja ELAN:n välillä tarkoittaa, että LEC2 on rekisteröitynyt samaan ELAN:iin ja vastaavat yhteydet kuin LEC1:illä ovat jo olemassa. Välttääkseen hävikkiä tiedonsiirrossa ja minimoidakseen latenssia yhteyden muodostamisessa LEC1 aloittaa tiedonsiirron BUS:n kautta ennen kuin vastaus saapuu LES:ltä. Tämä vastaa yleislähetystä LAN:ssa. Jos vastaus saapuu LES:ltä, LEC1 muodostaa suoran tiedonsiirtoyhteyden (6) LEC2:een. Ennen kuin suoraa yhteyttä aletaan käyttää, yhteys BUS:n kautta tyhjennetään, jotta kehykset saapuisivat oikeassa järjestyksessä. Käyttämättömät tiedonsiirtoyhteydet puretaan. Jos aikaisempi yhteys on jo purettu, mutta LEC1:illä on vielä muistissa LEC2:n ATM-osoite, uutta LANE ARP -pyyntöä ei tarvitse lähettää. (Marconi 2002a, 110 - 111.)



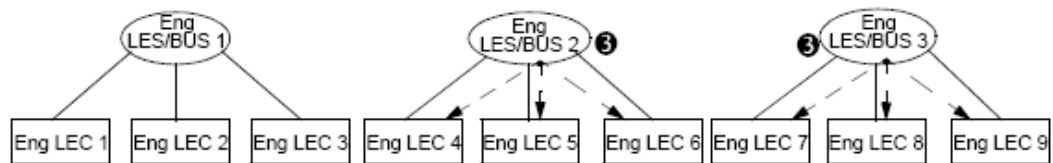
KUVIO 11. ELAN:n toiminta (Marconi 2002a, 109)

DLE (Distributed LAN Emulation) mahdollistaa LES/BUS-palveluiden jakamisen useille palvelimille, mikä tarjoaa vikasietoisuuden ja kuorman jakamisen. Kuorman jakamisen myötä myös ELAN:ien koko voi kasvaa, koska yksi palvelin voi palvella samanaikaisesti vain rajattua määrää LEC:itä. Paikallisen palvelimen käytöstä on se hyöty, ettei tarvitse käyttää hitaita WAN-linkkejä. Jokainen DLE-palvelin ylläpitää p2mp-yhteyttä broadcast-liikennettä ja hallintatiedon tulvimista varten sekä yksittäisiä p2p-yhteyksiä suoraa hallintaliikennettä varten DLE-vertaispalvelimiin. DLE-palvelimet ovat vastuussa ELAN:nsa rekisteröintitietojen jakamisesta sekä paikallisille LEC:ille että DLE-vertaispalvelimille. Kuviossa 12 LEC1 haluaa kommunikoida LEC9:n kanssa, joka on samassa ELAN:ssa, mutta paikallisesti kiinni eri DLE-palvelimessa. Ensin LEC1 lähettää IP ARP -pyynnön paikalliselle DLE BUS:lle (1), joka yleislähetää sen edelleen sekä paikallisille LEC:ille että DLE-vertaispalvelimille (2). (Marconi 2002a, 112 - 115.)



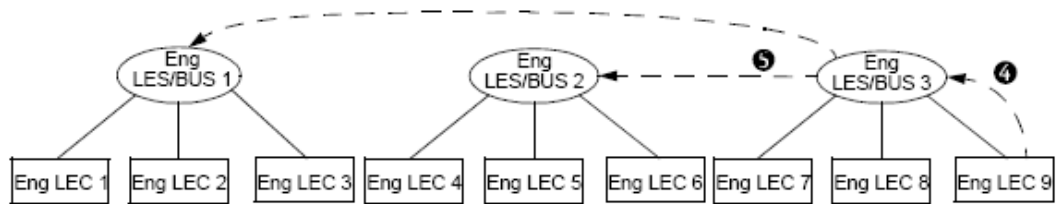
KUVIO 12. IP ARP -pyyntö LEC1:stä LEC9:ään (Marconi 2002a, 115)

Kuviossa 13 vastaanotettuaan yleislähetyksen DLE-palvelimet 2 ja 3 jakavat sen uudelleen omille paikallisille LEC:illeen (3), joten paketti saapuu tarkoitettuun määränpäähänsä (Marconi 2002a, 115).



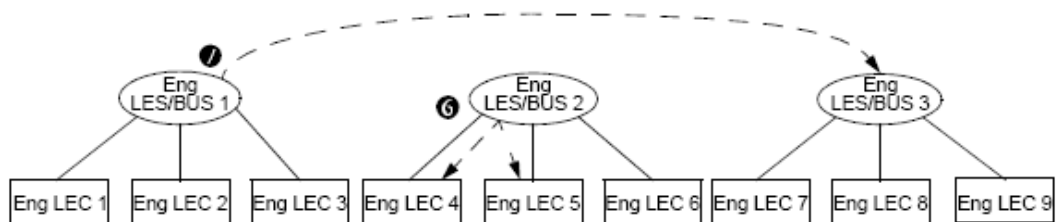
KUVIO 13. Yleislähetyksen uudelleen jakaminen (Marconi 2002a, 115)

Kuviossa 14 LEC9 tunnistaa IP-osoitteensa ja valmistautuu lähettämään IP ARP -vastauksen lähettämällä LANE ARP -pyynnön paikalliselle LES:ille (4) kysyäkseen LEC1:n MAC-osoitetta vastaavaa ATM-osoitetta. Koska LEC9:n paikallinen LES ei tiedä sitä, se lähettää pyynnön DLE-vertaispalvelimille (5). (Marconi 2002a, 115.)



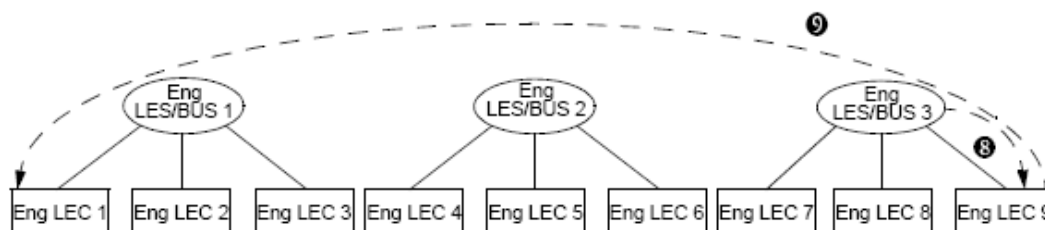
KUVIO 14. LANE ARP -pyyntö DLE-vertaispalvelimille (Marconi 2002a, 116)

Kuviossa 15 DLE-vertaispalvelin 2 on liittynyt kahteen paikalliseen välitys-LEC:hen (proxy LEC). Kun DLE-vertaispalvelin vastaanottaa LANE ARP -pyynnön, se ei pysty selvittämään sitä, joten se jakaa sen uudelleen välitys-LEC:illeen (6). DLE-vertaispalvelimet eivät jaa LANE ARP -pyyntöä uudelleen toisilleen, koska tämä synnyttäisi silmukan; ja välitys-LEC:illeenkin vain, jos niitä on. DLE-vertaispalvelin 1 on pystynyt selvittämään LEC1:n ATM-osoitteen ja on lähettänyt LANE ARP -vastauksen DLE-vertaispalvelimelle 3 (7). (Marconi 2002a, 116.)



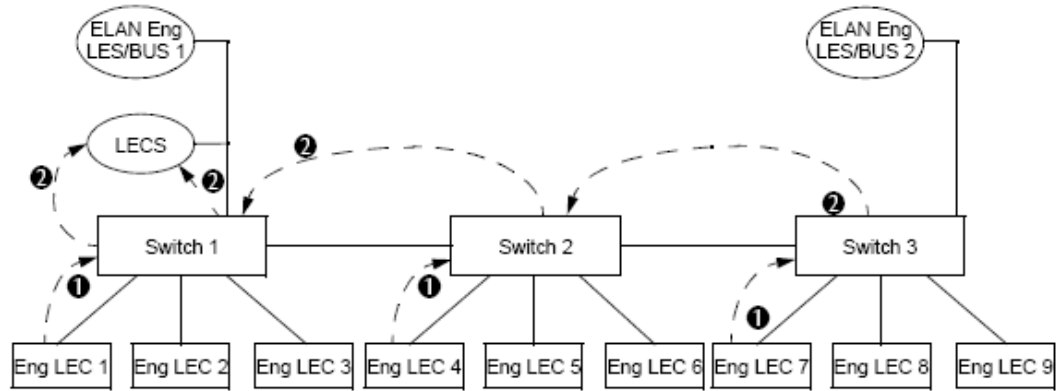
KUVIO 15. Yhden DLE-vertaispalvelimen LANE ARP -pyynnön uudelleen jakaminen ja toisen siihen vastaaminen (Marconi 2002a, 116)

Kuviossa 16 vastaanotettuaan LANE ARP -vastauksen DLE-vertaispalvelin 3 välittää sen suoraan LEC9:lle, joka lähetti alkuperäisen pyynnön (8). DLE-vertaispalvelin 3 myös tallentaa LEC1:n ATM-osoitteen, jottei muiden paikallisten LEC:iden tarvitse kysyä sitä uudelleen. Rekisteröintitiedot tosin vanhenevat, joten niitä voi käyttää vain määrätyn ajan. LEC9 voi nyt lähettää IP ARP -vastauksen LEC1:lle (9). (Marconi 2002a, 116.)

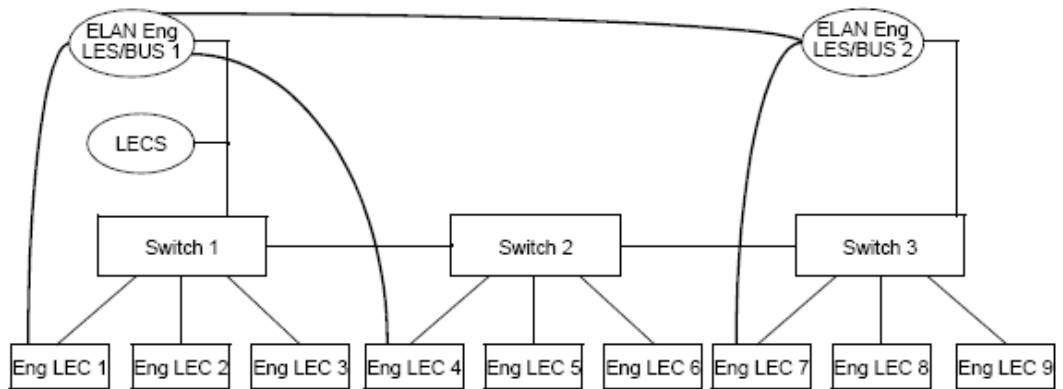


KUVIO 16. LANE ARP -vastaus vastaanotettu ja IP ARP -vastaus lähetetty (Marconi 2002a, 116)

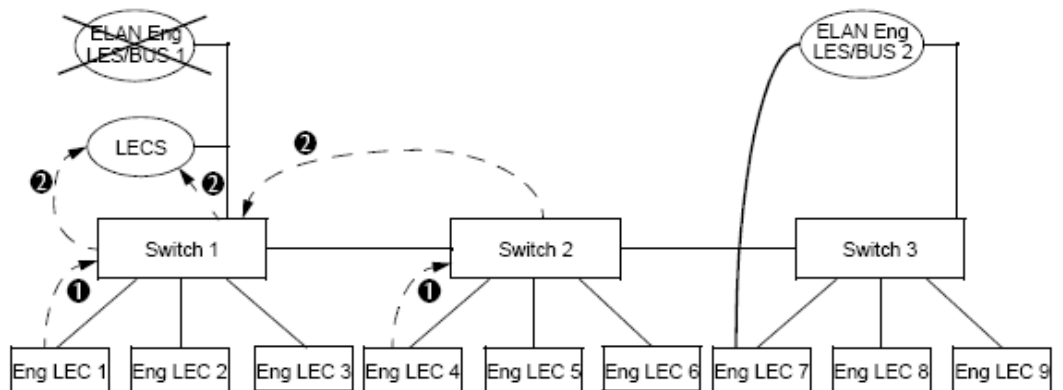
Kuten aikaisemmin on mainittu DLE mahdollistaa vikasietoisen ELAN:n, jossa yhden DLE-vertaispalvelimen vikaantuminen ei vaikuta sen kaikkien LEC:iden toimintaan ja jokaiselle LEC:ille on DLE-vertaispalvelin varalla. Kuviossa 17 kolme LEC:tä kysyy LECS:ltä LES:n osoitetta eri kytkimien kautta. (Marconi 2002a, 120.) Kytkimien väliseen signalointiin käytetään PNNI:tä (Marconi 2002a, 107). Kuviossa 18 LEC:t ovat liittyneet kahteen eri LES/BUS-pariin (Marconi 2002a, 120). LEC:t käyttävät yhtä anycast-osoitetta saadakseen yhteyden DLE-vertaispalvelimeen. PNNI löytää lähimmän palvelimen, joka käyttää tätä osoitetta. (Marconi 2002a, 107.) Kuviossa 19 toinen DLE-vertaispalvelin vikaantuu (Marconi 2002a, 121). Jos palvelin putoaa verkosta kokonaan, kaikki yhteydet siihen menevät poikki, signalointi lakkaa ja kytkin 1 poistaa sen osoitteen ARP-taulustaan. LEC:t 1 ja 4 ottavat automaattisesti uudelleen yhteyttä LECS:ään ja saavat siltä DLE-vertaispalvelimien anycast-osoitteen. LEC:t pyytävät kytkintä, jonka kautta yhteys palvelimeen oli muodostettu, muodostamaan yhteyden uudelleen. Kytkin 1 käyttää PNNI:tä yhteyden muodostamiseksi lähimpään toiminnassa olevaan DLE-vertaispalvelimeen kytkimien 2 ja 3 kautta. Kytkin 2 on voinut oppia kytkimeltä 1, että yhteys sen kautta on poikki, tai se yrittää sitä uudelleen, mutta tulee estetyksi (crankback). Kummassakin tapauksessa kytkin 2 muodostaa uuden yhteyden kytkimen 3 kautta. (Marconi 2002a, 121.) Kuviossa 20 on vikaantumisesta toipunut ELAN (Marconi 2002a, 122).



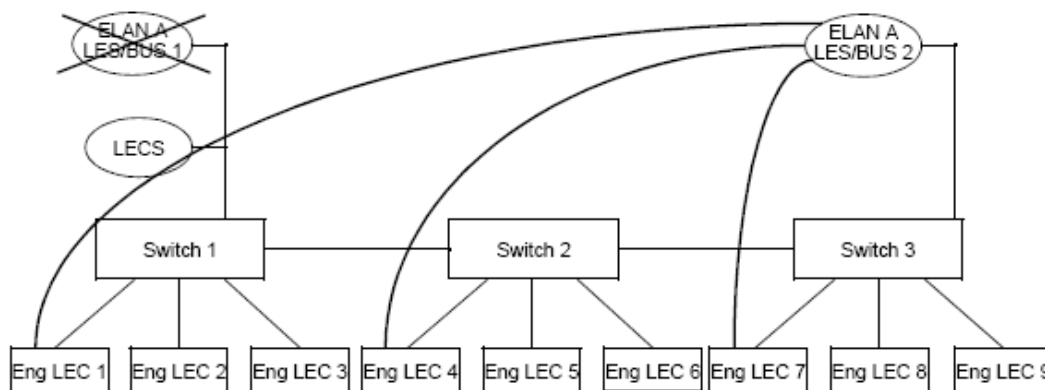
KUVIO 17. Rekisteröityminen DLE ELAN:ssa (Marconi 2002a, 120)



KUVIO 18. DLE ELAN toiminnassa (Marconi 2002a, 121)



KUVIO 19. DLE-vertaispalvelimen vikaantuminen ja toipuminen siitä (Marconi 2002a, 121)



KUVIO 20. Vikaantumisesta toipunut ELAN (Marconi 2002a, 122)

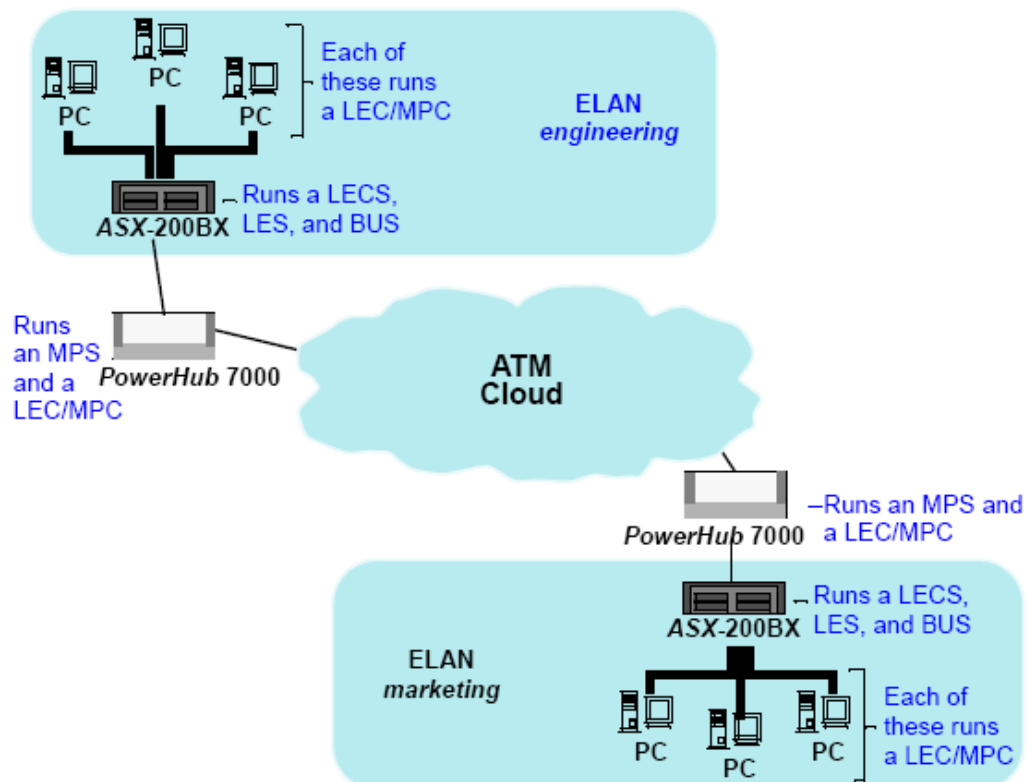
Pääsynvalvonta on mahdollista ottaa käyttöön ELAN:ssa. Saatuaan LES:n osoitteen LEC lähettää pyynnön LES:lle ELAN:iin liittymiseksi, joka tarkastetaan LES:n toimesta LECS:ssä. Jos LECS:ltä saadaan vahvistus, LES antaa LEC:lle luvan liittyä ELAN:iin. Jos vahvistusta ei saada, LES hylkää liittymispyynnön. Tarkastus suoritetaan myös aina, kun LECS lataa konfiguraatiodostonsa. Jos aikaisemmin hyväksytty LEC on estetty liittymästä, se hylätään ELAN:sta. (Marconi 2002a, 123.)

2.5 Multi-Protocol over ATM (MPOA)

MPOA (Multi-Protocol over ATM) perustuu LANE:en (Marconi 2002a, 164). Sen tarkoitus on tehostaa unicast-liikenteen siirtoa aliverkkojen välillä. MPOA ottaa käyttöön LEC/MPC:t (LANE/MPOA Client) ja MPS:t (MPOA Server) sekä määrittää protokollat niiden väliseen kommunikointiin. (Marconi 2002a, 165.) LANE käyttää reitittämiä pakettien siirtoon aliverkosta toiseen. Koska reitittimien täytyy tarkastaa jokainen paketti ja muuttaa sitä, ATM-solut täytyy koota pake- teiksi ja segmentoida takaisin jokaisessa reitittimessä, mistä seuraa suurempi siir- toviive. (Marconi 2002a, 164.) MPOA lisää LANE:en mahdollisuuden ohittaa rei- tittimet (Marconi 2002a, 165). Se edellyttää LANE:n toimiakseen. LEC/MPC:t toimivat MPOA-verkossa oikotien lähtöinä ja kohteina. Ne myös sisältävät NHC:n (NHRP Client). Oikotien lähtö valvoo liikennettä ELAN:n yli reitittimeen, joka sisältää MPS:n. Kun havaitaan vuo, joka hyötyisi oikotiestä, liikenne voidaan

välittää sen kautta. Oikotien kohde lisää sopivan kehyksen ja välittää liikenteen edelleen toiseen porttiin. (Marconi 2002a, 166.) MPS sisältää NHS:n (NHRP Server) ja on reitittimen looginen osa, joka tarjoaa reititystiedot LEC/MPC:ille. Se vastaa oikotielähtöjen MPOA-pyyntöihin ja tarjoaa kehystystiedot oikotiekohteille. Jotta oikotie voidaan muodostaa, LEC/MPC täytyy löytyä oikotien molempiin päihin, molemmista LEC/MPC:istä avautuvan reititinrajapinnan täytyy olla MPS ja NHRP-polun täytyy olla olemassa MPS:ien välillä. (Marconi 2002a, 167.)

Kuvion 21 MPOA-verkossa LEC/MPC:t rekisteröityvät samaan tapaan kuin LEC:t LANE-verkossa. Nyt LEC/MPC:t tunnistautuvat MPOA-tietoisina LECS:lle ja LES:lle, ja LECS määrittää menettelytavat vuon havaitsemiseen ja oikotien muodostamiseen. Verkkokerroksen protokollat voivat käyttää BOOTP:tä tai DHCP:tä yhteyksien muodostamiseksi. (Marconi 2002a, 168.)



KUVIO 21. Esimerkki MPOA-verkosta (Marconi 2002a, 167)

Oikotielähtöjen käyttämät vuonkuvaajat (flow descriptors) määrittävät, milloin oikotiet muodostetaan. Jos oikotie IP-osoitteeseen on jo olemassa, LEC/MPC käyttää tätä oikotietä. Jos oikotietä ei ole olemassa eikä sitä ole sallittukaan muodostaa, LEC/MPC lähettää paketin reitittimelle. Jos oikotie on sallittu ja vuon nopeus ylittää asetetun rajan, oikotie muodostetaan. Jos vuon nopeus ei ylitä asetettua rajaa, paketti lähetetään reitittimelle. (Marconi 2002a, 169.) Oikotielähtö aloittaa oikotien muodostuksen lähettämällä MPOA resolution request -sanoman MPS:lle, jota se käyttää reitittimenä (lähtö-MPS). MPS muuttaa sanoman NHRP request -sanomaksi. Tämä sanoma sisältää kohteen IP-osoitteen ja kysyy sitä vastaavaa ATM-osoitetta. Sanoma välitetään hyppy hypyltä MPS:lle, joka toimii reitittimenä kohdeosoitteelle (kohde-MPS). Kohde-MPS lähettää cache imposition request -sanoman oikotiekohteelle, joka vastaa cache imposition reply -sanomalla. MPS muuttaa sanoman NHRP response -sanomaksi. Lähtö-MPS muuttaa NHRP response -sanoman MPOA resolution response -sanomaksi ja välittää sen oikotielähdölle. Kohteen ATM-osoitteen sisältävän MPOA resolution response -sanoman vastaanotettuaan oikotielähtö tarkastaa, onko oikotietä ATM-osoitteeseen olemassa. Jos on, oikotielähtö lähettää paketit sen kautta; jos ei ole, se avaa uuden oikotien ja alkaa lähettää paketteja sen kautta. Sovellusohjelmat ja verkkokerroksen protokollat ovat MPOA-tietämättömiä, joten MPOA purkaa harvoin käytetyt oikotiet itse välttääkseen kuluttamasta resursseja loppuun päätelaitteissa ja verkossa. Kun oikotie on ollut käyttämättä säädetyn ajan, se puretaan. (Marconi 2002a, 170.)

MPOA on VRF-tekniikka (Virtual Routing and Forwarding), jonka edut perinteiseen reititykseen ovat tehokas tiedonsiirto aliverkkojen välillä ja parempi skaalautuvuus ja hallinta. Tampereen teknillisessä yliopistossa tehdyissä testeissä kahden reitittimen ohittaminen paransi verkon suoritustehoa 350 % LANE:en verrattuna. Reititysteho paranee, jos reititin pystyy toimimaan MPS:nä ja kun LEC/MPC:t huolehtivat tiedon välittämisestä. MPOA suoriutui paremmin myös palvelun laadun suhteen. (Vatiainen, Harju, Koivisto, Saaristo & Vihervaara 1999.)

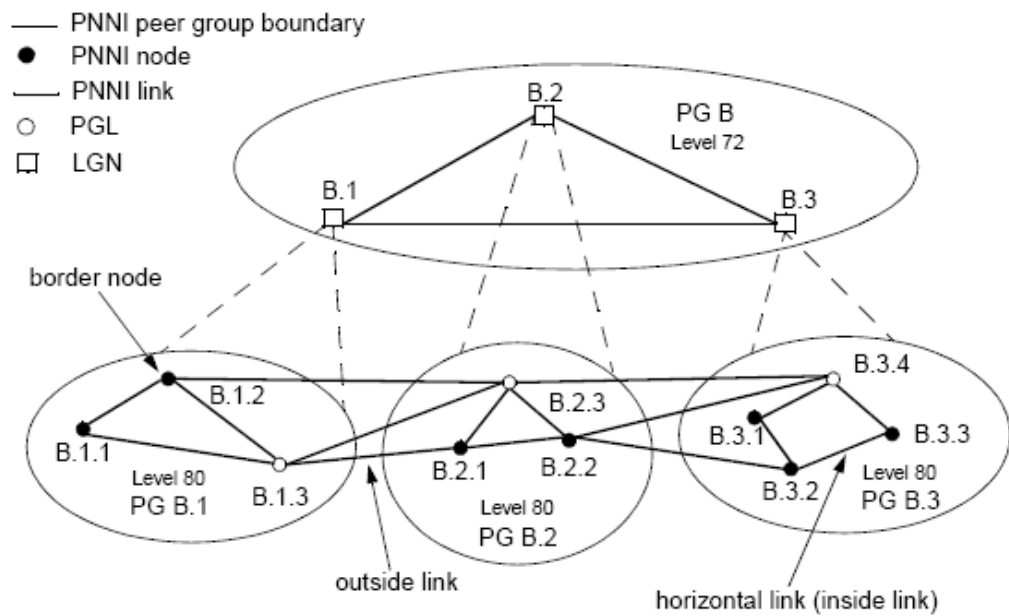
2.6 Private Network-to-Network Interface / Private Network Node Interface (PNNI)

PNNI (Private Network-to-Network Interface tai Private Network Node Interface) määrittää sekä reititys- että signaalintisopimukset yksityisten ATM-kytkimien välillä. Se on skaalautuva protokolla, joka yksinkertaistaa suuren verkon topologian järjestämällä verkkosolmut pienempiin ryhmiin, joten yhden solmun ei tarvitse ylläpitää topologiatietoja koko verkosta. (Marconi 2002a, 171.) PNNI-reititysprotokolla mahdollistaa topologia- ja saavutettavuustietojen jakamisen kytkimien ja kytkinryhmien välillä. Saavutettavuustiedot kertovat, miten saada yhteydet ATM-osoitteisiin, joita käytetään reittien laskemiseen verkon yli. Protokollassa ovat keskeisiä seuraavat osat:

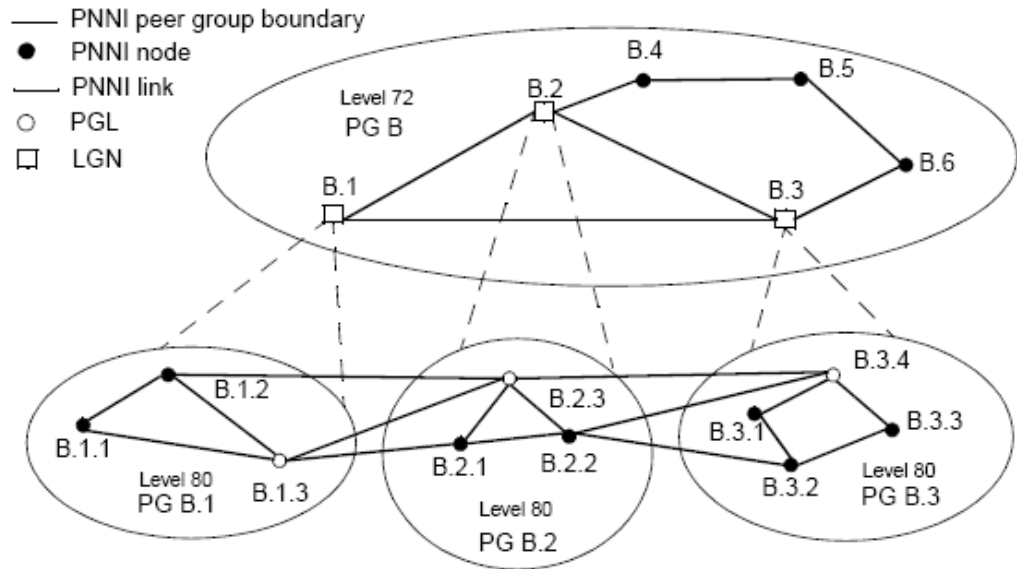
- Hello-protokolla, jota käytetään naapurisolmujen löytämiseen ja tunnistamiseen sekä määrittämään loogisten linkkien tila niihin.
- Database Exchange -protokolla, jota käytetään topologiatietojen vaihtoon kytkinten välillä, jotta tietokannat pysyvät ajan tasalla.
- Flooding-protokolla, jota käytetään topologiatietoyksiköiden, PTSE:iden (PNNI Topology State Element) levittämiseen.
- Path Computation, joka laskee reitin lähdekytkimestä kohdekytkimeen.
- Hierarchical Routing, joka jakaa verkon vertaisryhmiin. (Marconi 2002a, 172 - 173.)

Jokaista vertaisryhmää edustaa yksi PGL-solmu (Peer Group Leader), joka vaihtaa topologiayhteenvedoja ja saavutettavuustietoja omasta ryhmästään muiden ryhmien PGL:ien kanssa. Kytkimet vertaisryhmän sisällä vaihtavat yksityiskohtaisia topologiatietoja omasta ryhmästään, jotka eivät näy ryhmän ulkopuolisille kytkimille. Kytkimet tietävät muiden vertaisryhmien kytkimistä vain sen, että ne ovat saavutettavissa PGL:n kautta. (Marconi 2002a, 173.) Kaikki vertaisryhmän jäsenet voidaan esittää yhdellä osoitteella. Ne ovat samalla tasolla ja yhteydessä toisiinsa vaakasuorien linkkien kautta. Ryhmän valitsema PGL aktivoi LGN:n (Logical Group Node) samassa kytkimessä. LGN:t edustavat ryhmäänsä seuraavalla ylemmällä tasolla. Kuviossa 22 kytkin B.1.1 kuuluu vertaisryhmään B.1 alimmalla tasolla, joka kuuluu vertaisryhmään B ylemmällä tasolla, jossa ryhmän LGN edus-

taa sitä. LGN:t tulvivat topologiayhteenvedoja ylemmällä tasolla omasta ryhmästä, joilta tieto kulkeutuu PGL:ille, jotka puolestaan välittävät tiedon omalle ryhmälleen. (Marconi 2002a, 175.) Rajasolmuilla, kuten B.1.2:lla kuviossa 22, on ainakin yksi vertaisverkon rajan ylittävä linkki. Tulvimista ei tapahdu näillä linkeillä vaan niitä käytetään saavutettavuuden mainostamisessa Hello-sanomin. Kuviossa 22 B.1.2 mainostaa B.2:a ja B.2.3 B.1:ä. Kuvion 23 toispuolisessa hierarkiassa alimman tason solmuja on samassa vertaisryhmässä LGN:ien kanssa. (Marconi 2002a, 176.)



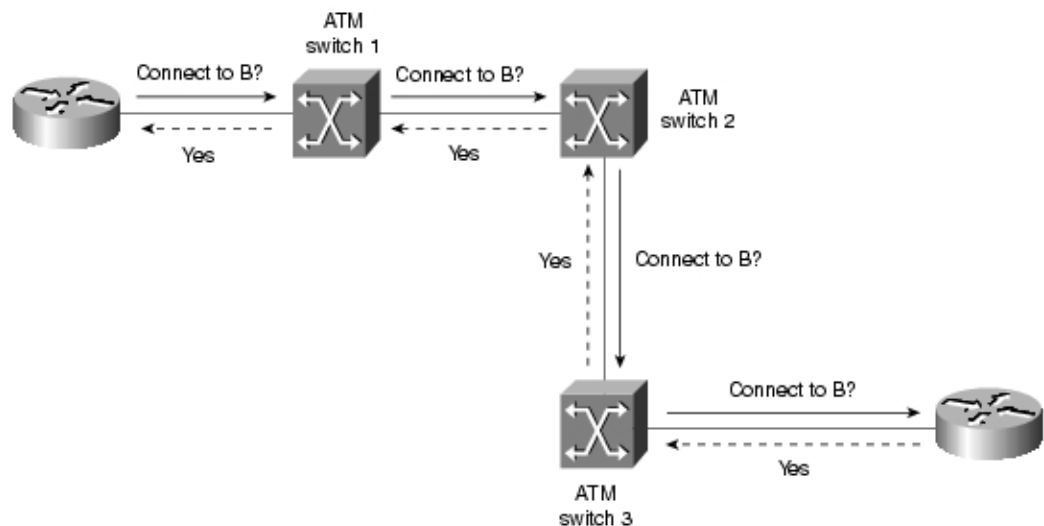
KUVIO 22. Esimerkki LGN-hierarkiasta (Marconi 2002a, 176)



KUVIO 23. Esimerkki toispuolisesta hierarkiasta (Marconi 2002a, 177)

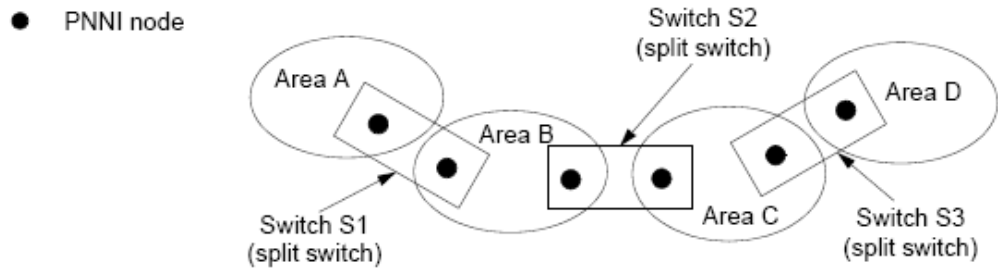
PNNI-signaalia käytetään muodostamaan p2p- ja p2mp-yhteyksiä verkon yli. DTL (Designated Transit List) määrittää reitin, jota reitittimien tulisi käyttää muodostaessaan SVC:itä tai SVP:itä. Jokainen rivi DTL:ssä edustaa yhtä hyppyä reitillä ja on esitetty PNNI-solmuna ja sen loogisena lähtöportina. DTL:t kootaan tauluun, jossa niille annetaan painoarvo määrittämään niiden prioriteetti. Kun SPVC tai SPVP muodostetaan, testataan DTL:t siihen liitettyssä taulussa suurimmasta painoarvosta aloittaen kunnes QoS-vaatimukset täyttävä reitti löytyy. Yhteys voidaan reitittää myös dynaamisesti, jos vaihtoehtoinen reitti on olemassa ja mikään käyttäjän määrittämistä DTL:istä ei kelpaa. Muussa tapauksessa yhteydenmuodostus epäonnistuu, mutta sitä yritetään uudelleen määräajoin. Jos reitin varrella on solmu, joka ei hyväksy yhteydenmuodostuspyyntöä, crankback mahdollistaa osittaisen uudelleenreitityksen, jottei reittiä tarvitse purkaa lähdekytkimeen asti. (Marconi 2002a, 178 - 179.) VCI 18 on varattu PNNI:lle (Cisco 2006, 16). Kun päätelaite haluaa muodostaa yhteyden toiseen päätelaitteeseen, se lähettää setup-sanoman kytkimelle, johon se on liittynyt. Sanoma sisältää kohdeosoitteen ja lähteen yhteydelle vaatimat QoS-parametrit. Signaali riippuu linkin tyyppistä, joka voi olla joko UNI tai NNI. Kuviossa 24 yhteys muodostetaan reitittimestä A reitittimeen B. Kytkin 1 lähettää call proceeding -sanoman vastauksena

reitittimen lähettämälle setup-sanomalle. Kun pyyntö yhteyden muodostamiseksi on reititetty ja vastaanotettu kohdeosoitteessa, kohde joko hyväksyy sen lähettämällä connect-sanoman takaisin lähdeosoitteeseen, johon reititin vastaa connect acknowledge -sanomalla tiedonsiirron aloittamiseksi, tai hylkää sen release-sanomalla, joka purkaa yhteyden. (Cisco 2006, 14 - 15.)

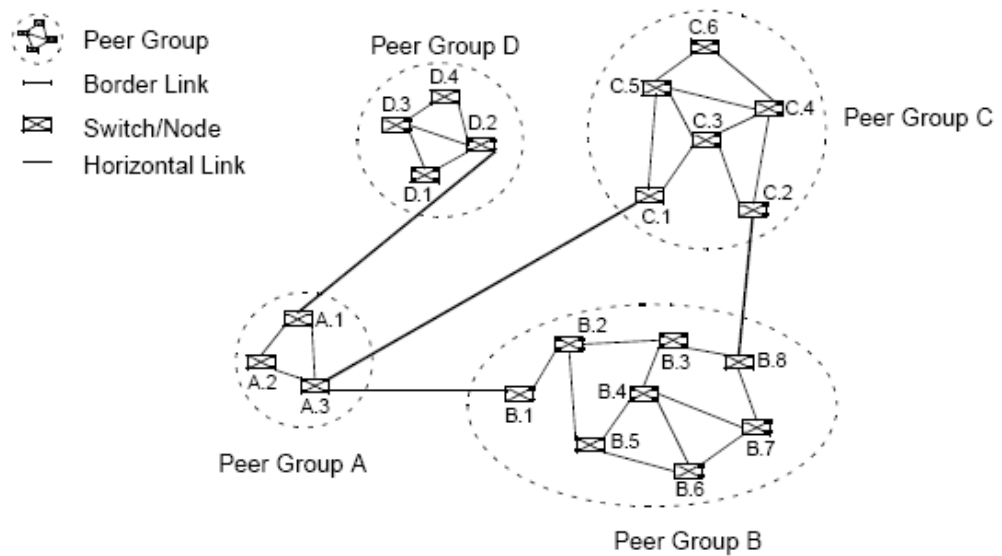


KUVIO 24. ATM-yhteydenmuodostus (Cisco 2006, 15)

Käyttämällä jaettuja kytkimiä on mahdollista hallita saavutettavuustietojen jakamista vertaisryhmien välillä. Tämä dynaaminen tiedon vuotaminen tapahtuu ryhmittelemällä solmut kytkimessä alueisiin (area ja domain) ja määrittämällä, miten tarvittaessa suodattaa saavutettavuustietojen mainontaa. Eri alueisiin (domain) kuuluvat kytkimen solmut eivät vaihda tietoja. Area on solmujen osajoukko, jossa solmut vaihtavat saavutettavuustietoja keskenään. Niillä on identtiset reititystaulut. Area voi olla joko yksittäinen vertaisryhmä tasaisessa verkossa tai hierarkkinen verkko, joka koostuu useasta vertaisryhmästä. Kuviossa 25 jaettuja kytkimiä on käytetty yhdistämään neljä aluetta toisiinsa. (Marconi 2002a, 189.) Yhdellä alueella voi olla useita vertaisryhmiä, jotka on yhdistetty toisiinsa rajalinkeillä kuten kuviossa 26 (Marconi 2002a, 190).

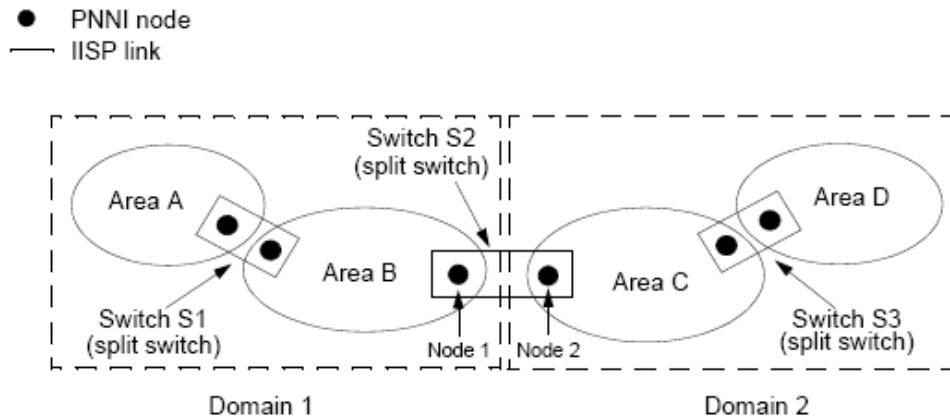


KUVIO 25. Jaettujen kytkinten yhdistämät alueet (Marconi 2002a, 189)



KUVIO 26. Yhdistetyt vertaisryhmät alueen sisällä (Marconi 2002a, 190)

Hierarkkisessa verkossa area voi olla yhdistetty kuinka moneen alueeseen tahansa yhtä tasoa alemmalla tasolla, mutta korkeintaan yhteen alueeseen ylemmällä tasolla (Marconi 2002a, 190). Domain on suurempi alue, joka koostuu pienemmistä alueista (area), joka mahdollistaa yhdistettävyyden niiden välillä ilman staattisia reittejä. Saavutettavuustietoja vaihdetaan suurempien alueiden välillä vain, jos staattiset reitit niiden välillä ovat olemassa. Kuviossa 27 kytkin alueiden A ja B välillä vuotaa tietoa, joten solmu yhdessä alueessa tavoittaa solmun toisessa. Sama tilanne pätee alueiden C ja D välillä. Keskimmäisen kytkimen solmut kuuluvat eri alueisiin (area ja domain), joten tarvitaan staattinen reitti solmujen väliseen tiedonsiirtoon. (Marconi 2002a, 191.)



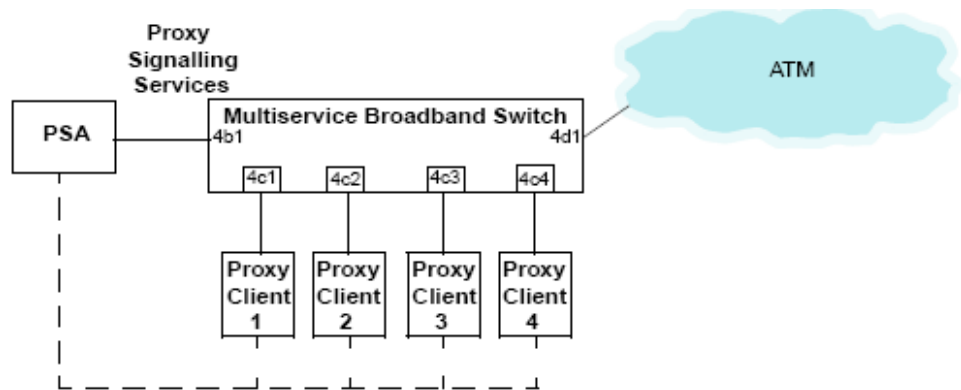
KUVIO 27. Reitti suurempien alueiden välillä (Marconi 2002a, 191)

Saavutettavuustietojen vuotamiseen alueiden (area) välillä vaikuttaa suodatuspolitiikka (Marconi 2002a, 192). Solmun saadessa tiedon osoitteesta suodatuspolitiikka määrittää, mainostetaanko koko osoite, osa osoitetta vai jätetäänkö koko osoite mainostamatta vertaisryhmälle (Marconi 2002a, 193). Suodatuspolitiikkaan kuuluu myös asettaa rajat saavutettavuustietojen vuotamiselle. Raja on ylin taso, jolla osoitetta voidaan mainostaa. Rajauksella varmistetaan, ettei silmukoita synny. (Marconi 2002a, 194.)

QoS-kaistanleveysparametrit (CTD, CDV ja CLR) voidaan määrittää myös virtuaalipoluille PNNI:ssä. Palveluluokka voidaan jättää määrittämättä polulle, jolloin sitä ei mainosteta, eivätkä yhteydet, joille on määrätty palveluluokka, voi käyttää polkua. (Marconi 2002a, 196.) Palveluluokille voidaan määrittää myös kuorman jakava reititys, joka mahdollistaa tehokkaamman resurssien käytön ja auttaa ruuhkatilanteiden hallinnassa. Siinä vaihtoehtoisia linkejä voidaan tallentaa jokaiselle hypylle, minkä jälkeen DTL:stä, joka rakennetaan kohteesta lähteeseen, valitaan sattumanvaraisesti linkit, jotka muodostavat reitin. Jos CTD- ja CDV-vaatimuksia ei voida täyttää, käytetään normaalia reititystä. (Marconi 2002a, 197.) UBR:lle voidaan käyttää kuorman jakavaa reititystä ruuhkatilanteen mukaan (Marconi 2002a, 198).

Proxy-signalointi on vaihtoehto yhteyksien muodostamiselle PVC:iden ja SPVC:iden varaamisen sekä SVC:iden signaloinnin lisäksi. Se mahdollistaa

PSA:n (Proxy Signalling Agent) signaloida yhden tai useamman ATM-ES:n puolesta. (Marconi 2002a, 226.) Kuviossa 28 ES:t on liitetty kytkimeen, joka tarjoaa proxy-signaalointipalvelun, johon PSA puolestaan on liitetty. (Marconi 2002a, 227.)



KUVIO 28. Proxy-signaalointiesimerkki (Marconi 2002a, 226)

2.7 ATM-yhteenveto

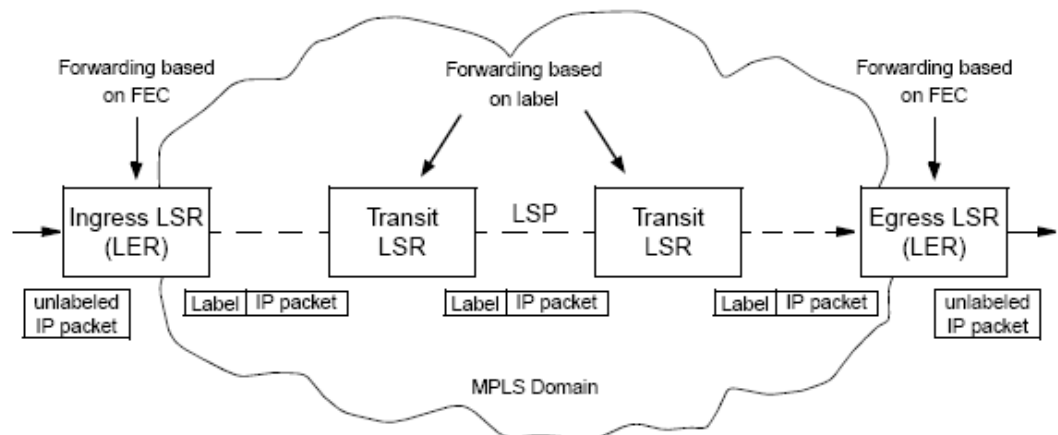
Datan ja viimekädessä pakettien saapuessa ATM-sovituserrokselle ne segmentoidaan lähetettäessä ja kootaan uudelleen vastaanotettaessa ja esitetään ATM-kerrokselle liikennetyypille sopivalla palvelun laadulla, jossa niistä muodostetaan ATM-soluja ja siirretään joko staattisia tai dynaamisia piirikytkentäisiä yhteyksiä pitkin. Dynaamisia yhteyksiä varten on oma reititys- ja signaalointiprotokolla, PNNI.

ATM-yhteydet käyttävät virtuaalikanavia, jotka kanavoidaan virtuaalipolkujen sisälle. UBR-palveluluokkaa lukuun ottamatta liikenteelle voidaan määrittää kaistanleveysparametrit ja sen palvelun laatu taata. UBR varaa dynaamisesti kaistanleveyttä linkiltä mahdollisuuksien mukaan eikä sitä voi rajoittaa ei-elastisilla virtuaalipoluilla. LAN-liikenteelle sovitettun AAL5-liikennetyypin lisäksi ATM tarjoaa LAN-emulointitekniikoita, kuten LANE:n, joka tarjoaa broadcast- ja multicast-palvelut. Näiden lisäksi on vielä MPOA, joka nopeuttaa LANE-liikennettä, ja MPLS, joka käsitellään seuraavassa luvussa.

3 MULTI-PROTOCOL LABEL SWITCHING

3.1 MPLS-arkkitehtuuri

Perinteisessä IP-reitityksessä paketit kulkevat verkon yli hyppy kerrallaan reitittimeltä toiselle ja jokainen reititin valitsee parhaimman seuraavan hypyn. IP on yhteydetön protokolla, joten se ei tarjoa QoS:ää tai tehokasta resurssien käyttöä. ATM puolestaan on yhteydellinen protokolla, jonka parhaat ominaisuudet yhdistyvät yhteydettömän IP-protokollan parhaimpiin ominaisuuksiin MPLS:ssä. (Marconi 2002b, 36.) Reititin valitsee hypyn paketin kohdeosoitteen perusteella. Kaikilla osoitteilla, joilla on sama prefiksi, on myös sama FEC (Forwarding Equivalence Class) ja sama lähtöportti. MPLS:ssä jokainen FEC on yhdistetty eri otsikkoon, joka määrää lähtöportin ilman hakua reititystaulusta. (Perros 2005, 137.) Koska otsikkotaulu on pienempi kuin reititystaulu, haku on nopeampaa ja se kuluttaa vähemmän resursseja (Perros 2005, 141). Kuviossa 29 LSR (Label Switch Router) on MPLS:ää tukeva kytkin tai reititin, joka välittää MPLS-otsikoituja IP-paketteja perinteisen IP-reitittämisen lisäksi. Tulo- ja lähtö-LSR:iä voidaan kutsua LER:iksi (Label Edge Router). Riippuen LSR:n tyypistä ja sen sijainnista verkossa sen tehtävät IP-reitityksen lisäksi vaihtelevat kuten taulukossa 2 on esitetty. (Marconi 2002b, 38 - 39.)

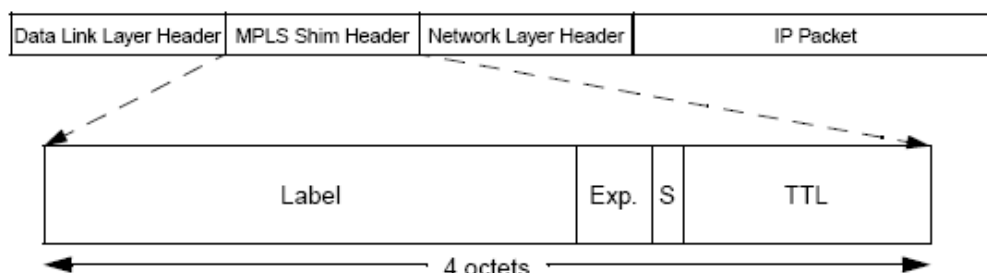


KUVIO 29. MPLS-komponentit (Marconi 2002b, 38)

TAULUKKO 2. Erityyppisten LSR:ien tehtävät (Marconi 2002b, 39)

Tyyppi	Sijainti	Tehtävä(t)
Tulo-LSR	MPLS-alueen tulevalla reunalla	<ul style="list-style-type: none"> Luokittelee otsikoimattomat IP-paketit FEC:hen, yhdistää otsikon FEC:hen ja otsikoi tulevat otsikoimattomat IP-paketit ja välittää ne.
Kauttakulku-LSR	MPLS-alueen sisällä	<ul style="list-style-type: none"> Välittää otsikoidut IP-paketit.
Lähtö-LSR	MPLS-alueen lähtevällä reunalla	<ul style="list-style-type: none"> Poistaa otsikon tulevista IP-paketeista.

MPLS-otsikko on 20-bittinen tunniste, jota käytetään tunnistamaan FEC. Otsikoilla on vain paikallista merkitystä. Se on osa 4-tavuista MPLS-otsaketta, joka sijoitetaan siirto- ja verkkokerroksen otsakkeiden väliin. Kuviossa 30 esitetyn otsakkeen muut kentät ovat 3-bittinen Exp. (Experimental), jota voidaan käyttää ToS:n (Type of Service) tai CoS:n osoittamiseen; 1-bittinen S (Bottom of Stack), joka arvolla 1 osoittaa osoitepinon alimman otsikon; ja 1-tavuinen TTL-parametri (Time to Live). LSR:t käyttävät ylintä otsikkoa välittäessään paketteja, joissa on useampi otsikko LIFO-mallisessa pinossa. (Marconi 2002b, 39 - 40.)



KUVIO 30. MPLS-otsake (Marconi 2002b, 39)

Päätöksen otsikon yhdistämisestä FEC:hen tekee LSR alavirtaan päin. Tieto yhdistämisestä kulkee ylävirtaan takaisin yhdistämisspyynnön tehneelle LSR:lle. (Marconi 2002b, 40.) Kun tulo-LSR vastaanottaa otsikoimattoman IP-paketin,

1. se etsii FEC:stä paketin kohdeosoitteen seuraavan hypyn selvittämiseksi.
2. FEC määrää pakettiin liitettävän (push) otsikon. TTL kopioidaan IP-otsakkeesta MPLS-otsakkeeseen ja sen arvosta vähennetään yksi, minkä jälkeen paketti lähetetään eteenpäin.

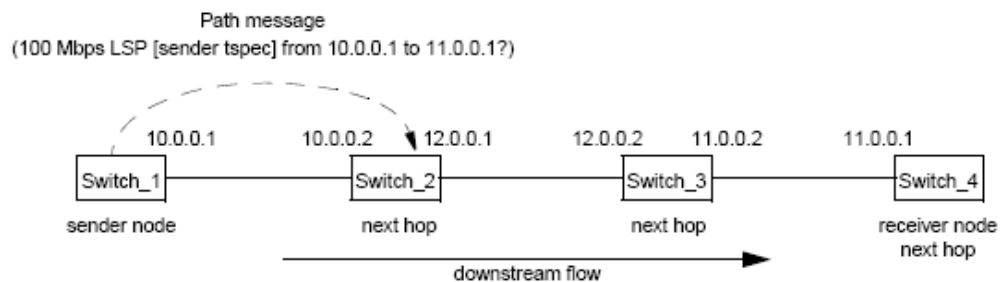
3. Jokainen kauttakulku-LSR vaihtaa (swap) otsikon ja vähentää edelleen TTL-arvoa yhdellä. Otsikon vaihtamisessa yksi otsikko poistetaan (pop) ja toinen liitetään (push) sen paikalle perustuen poistettavaan otsikkoon.
4. Lähtö-LSR poistaa (pop) otsikon. TTL kopioidaan MPLS-otsakkeesta IP-otsakkeeseen ja sen arvosta vähennetään yksi. (Marconi 2002b, 41.)

Yhtä otsikkoa kohti voi olla useampi lähtöportti, mikä mahdollistaa kuorman jakamisen ja vikasietoisuuden (Perros 2005, 143). On myös mahdollista, että useammalla FEC:llä on sama reitti, jos niillä on sama lähtö-LSR, jolloin on mahdollista joko yhdistää ne yhteen tai useampaan FEC:hen tai pitää ne erillään (Perros 2005, 145).

LSP (Label Switched Path) on yksisuuntainen polku yhden tai useamman LSR:n kautta, jota pitkin FEC:ssä määritetyt paketit välitetään. LSP ei voi käsittää kuin yhden IGP-alueen (Interior Gateway Protocol). LSP on joko dynaaminen tai staattinen. Dynaaminen LSP on reititysprotokollan automaattisesti konfiguroima ja signointiprotokollan signaloima, ja staattinen käyttäjän manuaalisesti konfiguroima. Staattisia LSP:itä on PLSP:inä (Permanent LSP), jotka ovat signaloimattomia ja käsin konfiguroituja samaan tapaan kuin ATM PVC:t, ja SP-LSP:inä (Signalled Permanent LSP), jotka on konfiguroitu signointiprotokollan välityksellä. Dynaaminen LSP tarjoaa vain best effort -palvelun. Staattinen LSP takaa QoS:n, ja otsikoiden vaihdot konfiguroidaan käsin PLSP:ille tai neuvotellaan signointiprotokollan välityksellä SP-LSP:ille. (Marconi 2002b, 42 - 43.) SP-LSP voidaan luoda joko määrittämällä hyppylista, jonka mukaan polku kulkee eri LSR:ien kautta (Marconi 2002b, 47), tai antamalla lähtökytkimen laskea reitti oppimansa verkkotopologian avulla (Marconi 2002b, 48). Staattiset LSP:t voidaan luoda liikenteenhallintaa hyväksi käyttäen, jolloin ei vain lasketa lyhintä reittiä vapaana olevien resurssien perusteella, kuten perinteinen reititysprotokolla tekee, vaan otetaan huomioon myös reittien käyttöaste. Liikenteenhallintaan käytetään IntServ-mallia (Integrated Services), joka takaa QoS:n. (Marconi 2002b, 49.) MPLS-otsakkeen ToS- ja CoS-bittejä käytetään DiffServ-mallissa (Differentiated Services) (Marconi 2002b, 40).

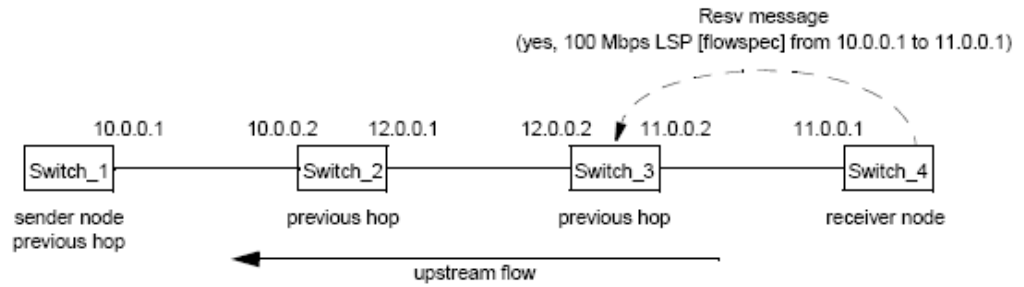
3.2 Resource Reservation Protocol (RSVP)

RSVP (Resource Reservation Protocol) on signaalointiprotokolla, jota käytetään LSP:iden luomiseen dynaamisesti. LSP on olemassa vain tiedonsiirron ajan. RSVP toimii IGP:n reititystauluihin keräämien tietojen tai staattisten reittien pohjalta. RSVP-sanomat voidaan lähettää samaa polkua pitkin sekä ala- että ylävirtaan. Lähettäjäsolmu mainostaa tiedonsiirtokykyään Path-sanomassa vastaanottajasolmulle ja kaikille polun varrella oleville RSVP-tietoisille solmuille. Kuviossa 31 on esitetty kuinka kytkin 1 haluaa luoda 100 Mbps LSP:n kytkimeen 4 lähettämällä naapurilleen (kytkin 2) Path-sanoman, joka sisältää vaaditun kaistanleveyden lisäksi LSP:n päätepisteiden osoitteet. Koska kytkimet 2 ja 3 eivät ole vastaanottajasolmuja, ne välittävät Path-sanoman eteenpäin ja tallentavat polun tiedot, jos polku voidaan muodostaa. Kytkin 4 vastaa Resv-sanomalla, jos polku on edelleen mahdollista muodostaa. (Marconi 2002b, 202 - 203.)

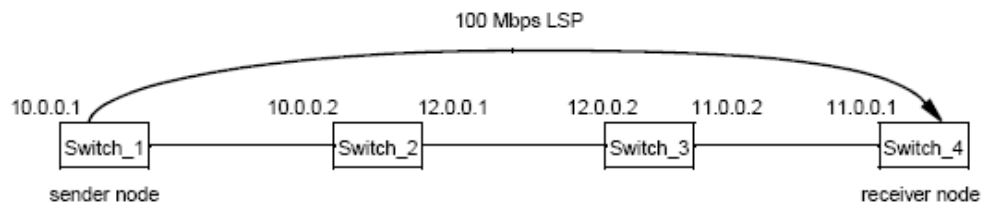


KUVIO 31. Path-sanoma on lähetetty kytkimeltä 1 kytkimelle 4 (Marconi 2002b, 203)

Resv-sanoma sisältää tiedon varatusta kaistanleveydestä kauttakulkusolmujen selvittäessä, riittävätkö niiden vapaana olevat resurssit vaadittujen resurssien varaimiseksi, kuten kuviossa 32 on esitetty. Jos polku on ollut mahdollista muodostaa jokaisella hypyllä alavirtaan ja vaadittu kaistanleveys on ollut mahdollista varata jokaisella hypyllä ylävirtaan, LSP muodostetaan kytkimestä 1 kytkimeen 4. Tämä LSP on esitetty kuviossa 33. (Marconi 2002b, 204.)



KUVIO 32. Resv-sanoma on lähetetty kytkimeltä 4 kytkimelle 1 (Marconi 2002b, 204)

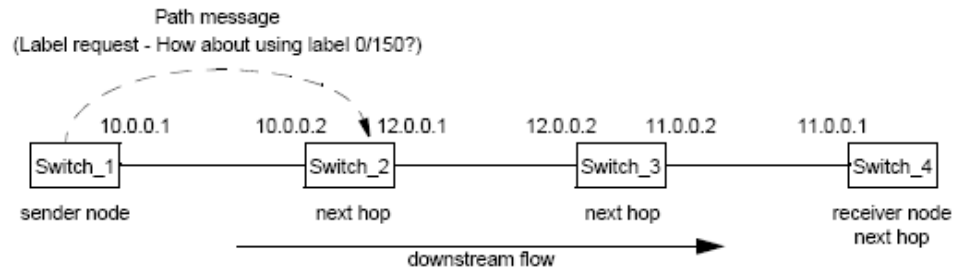


KUVIO 33. LSP on muodostettu kytkimestä 1 kytkimeen 4 (Marconi 2002b, 205)

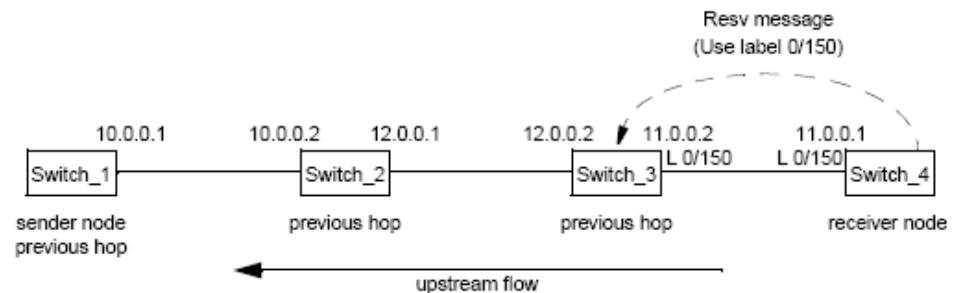
Jos kytkin ei pysty muodostamaan polkua tai sen vapaana olevat resurssit eivät riitä vaaditun kaistanleveyden varaamiseksi, se lähettää vastauksena PathErr- tai ResvErr-sanoman naapurilleen (Marconi 2002b, 205). Lähettäjäsolmu vahvistaa LSP:n ennen sen muodostamista lähettämällä vastaanottajasolmulle suoraan Resv-Conf-sanoman vastauksena Resv-sanomalle (Marconi 2002b, 206). LSP:n muuttuessa kytkimien tiedot sen tilasta ja sille varatusta kaistanleveydestä täytyy muuttua, jotta vanhan polun varrella olleet kytkimet, jotka eivät ole uuden polun varrella, voivat vapauttaa resurssit. Tietoja ylläpidetään Hello-sanomin. Aikakatkaistu poistaa vanhentuneet tiedot ja vapauttaa resurssit. Jos aikakatkaistu on liian hidas, voidaan resurssien vapauttamiseksi lähettää PathTear- tai ResvTear-sanoma, joista PathTear-sanoma pakottaa poistamaan tiedot sekä polun tilasta että sen varauksesta ja ResvTear-sanoma vain varaustiedon. (Marconi 2002b, 207.)

RSVP-TE (Extended RSVP) on laajennettu signaalointiprotokolla IP/MPLS-liikenteen hallintaa varten, joka jakaa otsikkotietoa Path-sanomassa. Tämä tieto vastaa

ATM:n VPI/VCI-tunnistetta ja kertoo reitittimelle, mitä polkua tulee käyttää pakettien välitykseen. Kuviossa 34 otsikkopyyntö on lähetetty Path-sanoman mukana. Jos pyydetty otsikko on käytettävissä, se merkitään käytettävissä olevaksi ja Path-sanoma välitetään eteenpäin. Kuviossa 35 otsikko on sisällytetty Resv-sanomaan, joka lähetetään takaisin. Kytkin 3 tallentaa otsikon. (Marconi 2002b, 208.)

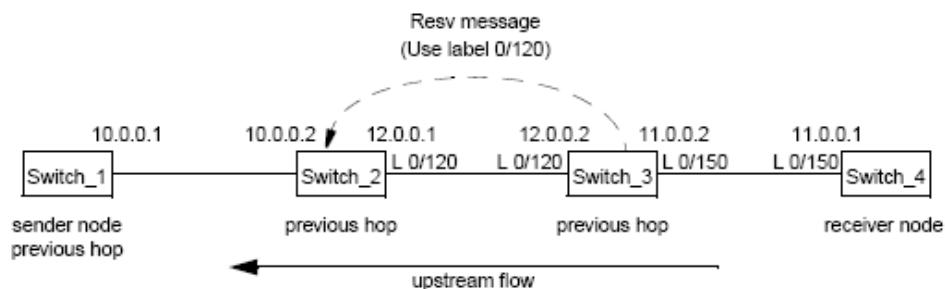


KUVIO 34. Otsikkopyyntö Path-sanomassa on lähetetty kytkimeltä 1 kytkimelle 2 (Marconi 2002b, 208)



KUVIO 35. Otsikko Resv-sanomassa on lähetetty kytkimeltä 4 kytkimelle 3 (Marconi 2002b, 209)

Kytkin 3 voi käyttää kytkimen 4 valitsemaa otsikkoa kytkimen 2 kanssa tai valita toisen riippuen siitä, onko se kytkimen 2 ja sen itsensä käytettävissä. Kuviossa 36 otsikko on eri kytkimien 2 ja 3 kuin kytkimien 3 ja 4 välillä. Kun kytkin 1 on tallentanut otsikon, kaikilla polun solmuilla on otsikko ja varsinainen tiedonsiirto voi alkaa. (Marconi 2002b, 209.)

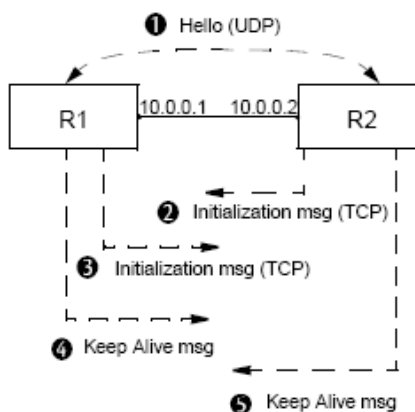


KUVIO 36. Otsikko Resv-sanomassa on vaihdettu ja lähetetty kytkimeltä 3 kytkimelle 2 (Marconi 2002b, 209)

3.3 Label Distribution Protocol (LDP)

LDP (Label Distribution Protocol) on toinen signaalointiprotokolla, jonka välityspäätökset perustuvat otsikoihin. LDP tukee vain dynaamisia LSP:itä. LDP:tä käytettäessä jokaisella LSP:illä on FEC, joka määrää sille kuuluvat paketit. LSR:t jatkavat LSP:itä liittämällä tulevia otsikoita lähteviin otsikoihin FEC:ssä. FEC voi sisältää yhden tai useamman kohdeosoitteen tai sen prefiksin. Jos LSP on jaettu useamman FEC-elementin kesken, se päätetään viimeistään kohdeosoitteen kohdalla niiden elementtien osalta, jotka eivät voi jatkaa samassa LSP:ssä. Otsikkotiedon vaihto tapahtuu LSR:ien kesken LDP-istunnossa. (Marconi 2002b, 248.)

LSR:t käyttävät LDP:tä löytääkseen LDP-tietoiset naapurit automaattisesti. Kuviossa 37 kaksi LSR:ää aloittavat LDP-istunnon lähettämällä toisilleen Hello-sanoman (1). Vastaanotettuaan Hello-sanoman kumpikin kytkin vertaa naapurin osoitetta omaansa. Suuremman osoitteen haltija lähettää Initialization-sanoman (2), joka sisältää tiedot, miten osoitetietoa tulisi mainostaa; onko silmukoiden havaitseminen päällä vai pois päältä; kuinka monta hyppyä LDP-sanoma voi tehdä ennen kuin silmukatilanne aistitaan (Path Vector Limit), jos silmukoiden havaitseminen on päällä; ja istunnon aikakatkaisusta. Initialization-sanomaan vastataan Initialization-sanomalla (3), minkä jälkeen lähetetään välittömästi Keep Alive -sanoma (4), joka ilmoittaa oikeiden tietojen saapumisesta. Keep Alive -sanomien vaihto (5) pitää istunnon aktiivisena. (Marconi 2002b, 249.)



KUVIO 37. Sanomanvaihto LDP-istunnossa (Marconi 2002b, 249)

Naapurikytkimillä voi olla useita istuntoja käynnissä yhtä rajapintaa kohden tai saman kytkimen useampi rajapinta voi liittyä samaan istuntoon, jolloin ne voivat jakaa otsikot. 6-tavuista LDP-tunnistetta käytetään LSR:n ja otsikon tunnistamiseen. Neljä ensimmäistä tavua määräävät yksiselitteisesti LSR:n esimerkiksi sille osoitetun reititintunnisteen muodossa ja kaksi viimeistä tavua otsikon LSR:ssä. (Marconi 2002b, 250.) LSR voi joko itsenäisesti mainostaa otsikkoa ylävirtaan ennen kuin alavirtaotsikko on vastaanotettu (Independent Label Distribution Control) tai sen täytyy vastaanottaa alavirtaotsikko ennen otsikon yhdistämistä FEC:hen ja sen lähettämistä ylävirtaan (Ordered Label Distribution Control) ellei kysymyksessä ole lähtö-LSR. Otsikoiden säilyttämiseen käytetään joko vanhoillista käytäntöä (Conservative Label Retention Mode), jolloin vain naapurilta saadut otsikot säilytetään, tai vapaata käytäntöä (Liberal Label Retention Mode), jolloin kaikki otsikot säilytetään. Vanhoillisessa käytännössä vain optimaaliset otsikot tiedon välittämiseksi säilytetään, joten tilaa niiden säilyttämiseksi säästyy uudelleenreitityksen kustannuksella, koska vikatilanteessa uudelta naapurilta on saatava otsikko ennen kuin tiedonsiirto voi jatkua. Vapaassa käytännössä varanaapurin otsikko on ylläpidettyjen otsikoiden joukossa. (Marconi 2002b, 251.) Osoitetiedon mainostuskäytäntö määrää, täytyykö LSR:n odottaa yhdistämisspyyntöä toiselta LSR:ltä ennen kuin se voi yhdistää otsikon FEC:hen ja lähettää sen (Downstream on Demand) vai voiko se tehdä niin ilman toimeksiantoa (Downstream Unsolicited). Molempia mainostuskäytäntöjä voidaan käyttää verkossa samanaikaisesti, mutta LDP-istunnon molempien LSR:ien täytyy käyttää samaa käytäntöä.

LDP ja RSVP-TE voivat toimia MPLS-verkossa samanaikaisesti ja itsenäisesti. (Marconi 2002b, 252.)

3.4 DiffServ ja IntServ

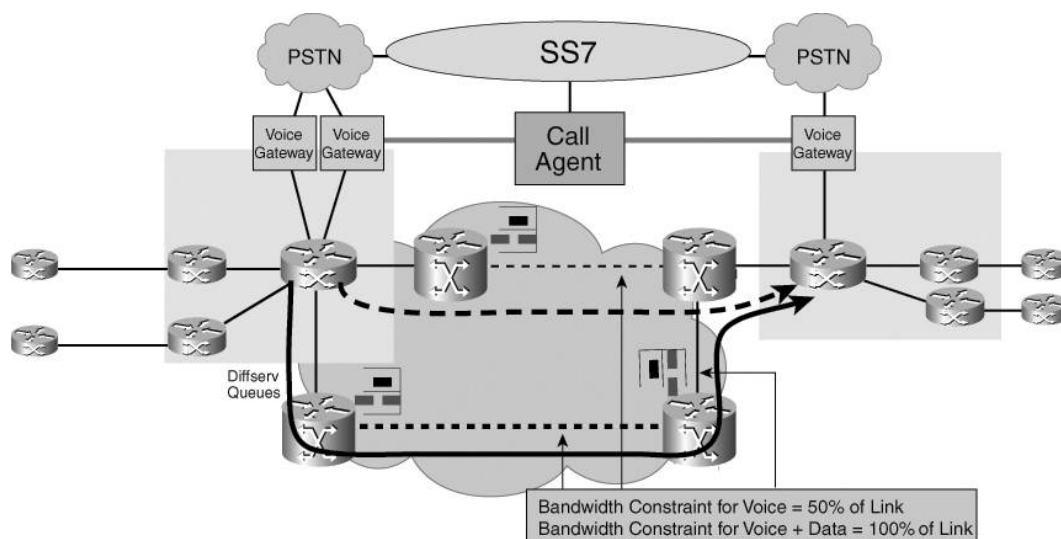
DiffServ kehitettiin takaamaan QoS. Se jakaa liikenteen luokkiin ja varaa resurssit niille erikseen. Merkitsemällä luokka IP-otsikkoon signalointiprotokollaa ei tarvita. Luokka merkitään 6-bittiseen DSCP-kenttään (DiffServ Code Point) alkuperäisen ToS-tavun alkuun ja se määrittää palvelun nopeuden paketille ja sen hylkäystodennäköisyyden puskurin ruuhkatilanteessa verkon solmukohdassa eli PHB:n (per-hop behavior). MPLS:ssä PHB on oltava johdettavissa otsikosta, joten siinä käytetään MPLS-otsakkeen Exp-bittejä. Jos verkko käyttää vain korkeintaan kahdeksaa luokkaa, kolme Exp-bittiä riittää, muussa tapauksessa käytetään lisäksi itse otsikkoa. PHB:tä ei signaloida vaan konfiguroidaan verkkosolmuihin. Se voidaan ottaa joko suoraan IP-paketin DSCP-kentästä tai määrittää itse. LSP:tä sanotaan E-LSP:ksi (Exp-inferred), jos se voi kantaa korkeintaan kahdeksan eri luokan paketteja. Jos luokkia tarvitaan enemmän, otsikkoa on käytettävä vastaanottajan ja palvelun nopeuden määrittämiseen, Exp-bitit määrittävät vain hylkäystodennäköisyyden. Koska nyt tekijöitä on kaksi, täytyy ne signaloida LSP:tä muodostettaessa. Tällaista otsikkoa käyttävää LSP:tä kutsutaan L-LSP:ksi (Label-inferred). Se voi kantaa paketteja useammasta PHB:stä, jotka eroavat vain hylkäystodennäköisyyden suhteen. (Lucek & Minei 2005, 10 - 12.) Ilman liikenteenhallintaa turvaamassa kaistanleveyttä vikasietoisessa verkossa paketteja putoaisi, jos varalinkin kaistanleveys ylitettäisiin. Muuttamalla varalinkkiin vaihtavan LSP:n Exp-bittejä otsikossa muutetaan sen kuljettamien pakettien hylkäystodennäköisyyttä. Ruuhkatilanteessa korkeamman hylkäystodennäköisyyden paketit hylätään ensin. (Lucek & Minei 2005, 93 - 94.)

Liikenteenhallinta (traffic engineering) luo LSP:t vapaana olevien resurssien mukaan varmistaen, että kaistanleveyttä on virhetilanteissakin saatavilla. Yhdistämällä TE DiffServ:hen se saadaan tehtyä CoS-tietoiseksi. Liikenteenvalvonnalla varmistetaan, ettei varattuja resursseja ylitetä. Siirrettäessä ääntä ja dataa samanaikaisesti tarvitaan DiffServ:ä luokittamaan äänelle pieni viive ja hävikki ja TE:tä

määrittämään äänen määrä suhteessa linkin nopeuteen pakottamalla omalta osaltaan viive pieneksi. DiffServ-TE varaa resurssit erikseen eri liikenneluokille käyttämällä malliluokkaa (class type), joka voi sisältää useamman PHB:n, jos CT on määritetty palvelun nopeuden suhteen ja PHB:t on luokiteltu samaan puskuriin. CT:tä käyttävä DiffServ-TE LSP voi kuljettaa vain yhden malliluokan mukaista liikennettä. Malliluokkia on kahdeksan ja jokaisella malliluokalla on kahdeksan prioriteettia, mutta niistä mainostetaan vain kahdeksaa yhdistelmää eli TE-luokkaa. Reititysprotokollan on tiedettävä jokaisen TE-luokan vapaana olevat resurssit jokaisella linkillä, jotta reitin laskeminen olisi mahdollista. TE-matriisi on konfiguroitavissa ja sen täytyy sisältää LSP:iden käyttämät alustus- ja varausprioriteetit. Olemassa olevan LSP:n purkuun vaaditaan sen varausprioriteettia korkeampi (pienempi numero) alustusprioriteetti. Kaikilla reitittimillä täytyy olla sama TE-matriisi. TE-luokkia mainostetaan käyttäen samaan tarkoitukseen TE:ssä tarkoitettua Unreserved Bandwidth TLV:tä (type-length-value), joten se on yhteensopiva DiffServ-TE:tä tukemattomien reitittimien kanssa. Signalointiin voidaan käyttää vain RSVP-TE:tä CT-lisäosilla. Jos lisäosia ei käytetä yhteyspyynnössä, se ymmärretään best effort -pyynnöksi. Jos reititin ei ymmärrä lisäosia, se hylkää niitä käyttävän yhteyspyynnön. Näin vanhat reitittimet voivat muodostaa yhteyksiä sekä uusiin että vanhoihin reitittämiin ja uudet vain toisiin uusiin. CT:n tai CT-ryhmän varaamaa kaistanleveyttä linkillä rajoittaa BC (bandwidth constraint). MAM (Maximum Allocation Model) on BC-malli, joka jakaa linkin kaistanleveyden CT:iden kesken, mutta yhdelle CT:lle varattua käyttämätöntä kaistanleveyttä ei voi jakaa toiselle CT:lle. RDM (Russian Doll Model) tehostaa kaistanleveyden käyttöä sallimalla sen jakamisen CT:iden kesken. Siinä CT7:lle on varattu kaistanleveys BC7, BC6 on varattu CT7:lle ja CT6:lle, BC5 CT7:lle, CT6:lle ja CT5:lle jne. BC0 eli linkin varaamaton kaistanleveys on varattu kaikkien CT:iden kesken. Maatuskamallissa CT:ille on määritettävä eri prioriteetit, koska ne kilpailevat yhteisestä kaistanleveydestä. Kaistanleveyden ylivaraaminen on myös mahdollista. (Lucek & Minei 2005, 112 - 126.) Moniluokka-LSP:t voivat kuljettaa usean malliluokan mukaista liikennettä ja niiden täytyy taata luokkien kokonaiskaistanleveys (Lucek & Minei 2005, 133).

DiffServ-TE on yhteensopiva TE:n kanssa, joka vastaa best effort -palvelua kahdeksalla prioriteettitasolla. Kuviossa 38 ääni ja data on määritetty eri luokkiin ja

äänelle on määritetty korkeampi prioriteetti, joten se käyttää ylempää reittiä ennen dataa. Ylempää reittiä ääni pitää parempana lyhyemmän viiveen takia. Dataliikenne on valinnut alemman reitin sen suuremman kaistanleveyden takia. (Guichard, Le Faucheur & Vasseur 2005, 88 - 89).



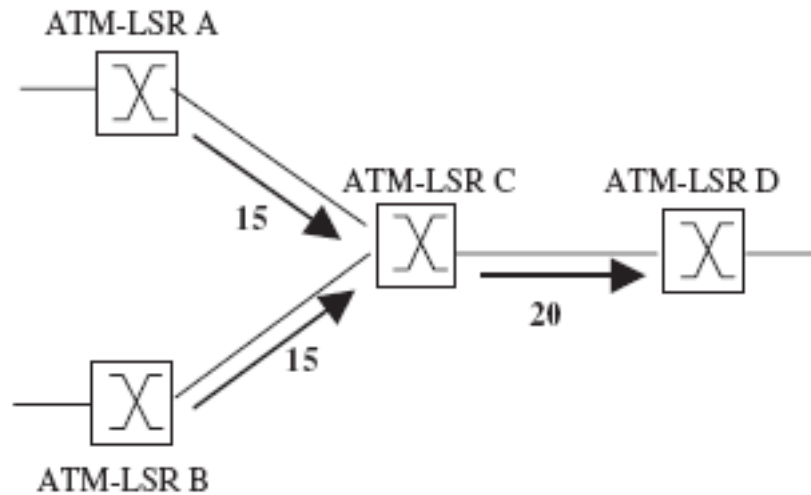
KUVIO 38. Ääni- ja dataliikenne DiffServ-TE-verkossa (Guichard, Le Faucheur & Vasseur 2005, 89)

IntServ on vuokohtainen QoS-malli. Resurssit varataan siinä erikseen jokaiselle vuolle, jotka on määritetty lähde- ja kohdeosoitteen, lähde- ja kohdeportin ja IP:n ToS-tavun perusteella, jotka on asetettu omiin puskureihinsa ja joita valvotaan liikennesopimuksilla. IntServ käyttää RSVP:tä signaalointiin. Pääsynvalvonta siirtotielle tapahtuu Resv-sanoman lähetyksen yhteydessä vastauksena Path-sanomaan. Vuokohtainen kaistanleveyden varaus skaalautuu huonosti runkoverkoissa ellei voiden lukumäärää ole mahdollista vähentää yhdistämällä useampi vuo. (Morrow & Sayeed 2007, 256 - 257.) IntServ-vuot voidaan luokitella DiffServ:n mukaisiksi MPLS-verkon reunalla. Pääsynvalvonta on edelleen vuokohtainen, mutta reitittimet ylläpitävät puskureitaan luokkakohtaisesti. (Morrow & Sayeed 2007, 267.) Marconi tukee CoS-versioita RSVP-sanomista MPLS-istunnoissa (Marconi 2002b, 227 - 228). RSVP ei ole sama IntServ:ssä ja tunneliperusteisessa MPLS TE:ssä, jossa se tarjoaa tarkemman palautteen QoS-varauksista kuin luokkaperusteinen RSVP ja joka skaalautuu hyvin 2000 LER:n ja 15 000 LSR:n kokoisissa

verkoissa (Morrow & Sayeed 2007, 243 - 244). Tunneliperusteinen MPLS-tuki on ehdotetun standardin asteella IESG:ssä (The Internet Engineering Steering Group) (Alvarez 2006, 18 - 19).

3.5 MPLS over ATM

Kun ATM-soluja siirretään MPLS-verkon yli, ATM-signaloinnin on korvannut IP-reititys. Samoin kuin IP-reititin ATM-kytkin oppii verkkotopologian ja laskee seuraavan hypyn kullekin paketille. MPLS-otsikko kuljetetaan VPI/VCI-kentässä LSP:tä pitkin. Kahta otsikkoa voidaan kuljettaa samanaikaisesti, ylempää VPI-kentässä ja alemmaa VCI-kentässä. ATM-LSR yhdistää uuden FEC:n otsikkoon, mutta ei mainosta sitä naapureilleen ennen kuin ylävirtanaapuri lähettää pyynnön saadakseen sen ennalta muodostettua virtuaaliyhteyttä pitkin. Tulo-LSR:ssä IP-paketti ensin kehystetään käyttäen AAL5:tä ja segmentoidaan ATM-soluiksi. LSP:n otsikkoa kuljetetaan solujen VPI/VCI-kentässä ja se vaihdetaan lähtöotsikkoon kauttakulku-LSR:issä ja solut kytketään määrättyyn lähtöporttiin kunnes lähtö-LSR saavutetaan, jossa solut kootaan takaisin paketeiksi ja toimitetaan IP-protokollalle. IP-pakettia ei siis koota uudelleen kauttakulku-LSR:issä. Kuviossa 39 on tilanne, josta voi syntyä ongelma siirrettäessä ATM-soluja MPLS-verkon yli. Jos kaksi kytkintä on liittynyt samaan alavirtakytkimeen, niiden soluina lähettämät paketit sekoittuvat sen lähtöportin puskurissa reitillä samaan lähtö-LSR:ään. Koska molempien kytkinten A ja B lähettämät solut lähetetään kytkimelle D otsikolla 20, se ei pysty erottamaan niitä toisistaan eikä kokoamaan niitä takaisin paketeiksi. Ongelman välttämiseksi yhteyksillä kytkimestä A kytkimeen D ja kytkimestä B kytkimeen D on käytettävä eri otsikoita. (Perros 2005, 146 - 147)



KUVIO 39. Virtuaalikanavien yhdistyminen (Perros 2005, 147)

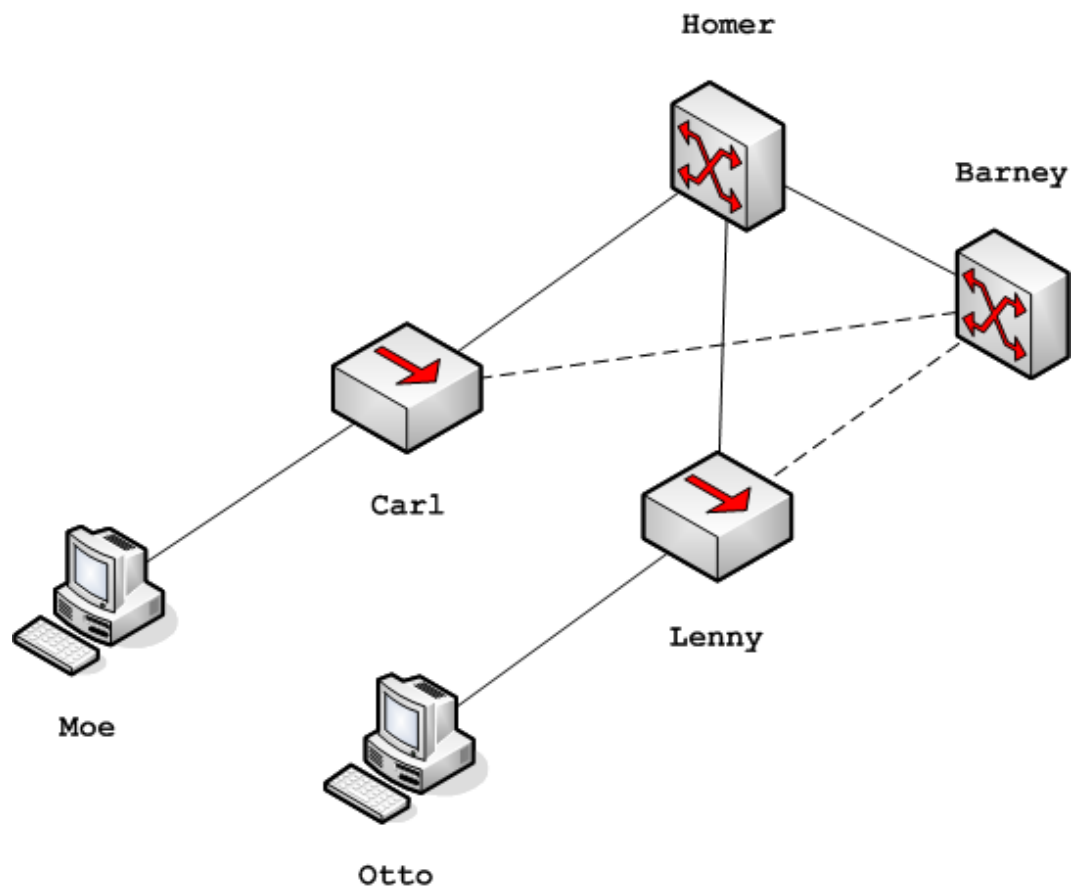
3.6 MPLS-yhteenveto

MPLS yhdistää verkkokerroksen reitityksen ja siirtokerroksen kytkennän eli sitä voidaan käyttää yhdistämään ATM tai muu siirtokerroksen tekniikka IP-reititykseen säilyttäen samalla liikenteen hallinnan segmentoimatta paketteja soluiksi tiedonsiirron nopeutumisen myötä. MPLS luokittelee paketteja liittämällä niihin otsikoita, joiden avulla paketit välitetään ja palvelun laatu niille voidaan taata. Otsikoita voidaan jakaa useamman signaalointiprotokollan välityksellä ja syntyvät yhteydet muistuttavat ATM-virtuaaliyhteyksiä, paitsi että ne eivät ole rajoittuneita kuljettamaan vain ATM-soluja. MPLS voikin käyttää olemassa olevaa ATM-infrastruktuuria tai päinvastoin. Toisaalta MPLS ei vaadi ATM:n tapaan monimutkaista sovitusta IP:n kanssa, joten se syrjäyttää ATM:n lopulta kokonaan. Entinen ATM Forum on nyt IP/MPLS Forum. Äänen siirrossa MPLS käyttää ATM:n AAL1- ja AAL2-palveluluokkia. Yksi mahdollisuus olisi siirtää ääntä samaan tapaan kuin käytännön osuudessa siirretään videota eli kehystämällä ääni RTP:llä, UDP:llä, IP:llä ja viimeisenä MPLS:llä ja siirtämällä se käyttäen ATM:ää tai Ethernetiä, mutta runkoyhteyksillä yleisestä puhelinverkosta MPLS odottaa vain saavansa AAL2:n mukaista dataa.

4 KÄYTÄNNÖN TESTIT

4.1 Testiympäristön kuvaus

Konfigurointi suoritettiin käyttäen kahta ForeRunner ASX-200 -kytkintä (BX/WG) ja kahta PowerHub 7000 -keskittintä ForeThought-ohjelmistoversion 6.0.1.E FCS-Patch (1.55283) Base-lisenssillä kytkimissä ja versiolla 5.2.1 (11967) keskittimissä kuvion 40 mukaisesti. Kytkimien Homer ja Barney väliset yhteydet ja niiden ja keskittimien Carl ja Lenny väliset yhteydet ovat 155 Mbps ATM-kuitulinkkejä (OC-3). Katkoviiivalla merkityt yhteydet ovat varayhteyksiä. Keskittimien ja päätelaitteiden Moe ja Otto väliset yhteydet ovat 100 Mbps Ethernet-kuparilinkkejä. Seuraavissa kappaleissa on käsitelty keskittimien tukemat 1483-kapselointitekniikat ja lähiverkkoemulointitekniikat. Kappaleessa 4.6 on keskitytty palvelun laatuun kytkimen porttien välisellä yhteydellä.



KUVIO 40. Laboratorioverkko

4.2 Sillattu 1483

Ensin luotiin sillattu yhteys kahden päätelaitteen välille keskittimien ja kytkimen Homer kautta. ATM-segmentti tulee ensin varata ennen kuin se voidaan ottaa keskittimissä käyttöön. Segmentit varataan korttipaikassa 4 komennon 1 mukaisesti, minkä jälkeen keskitin on käynnistettävä uudelleen, jotta muutokset tulevat voimaan. Tilan säästämiseksi tässä on vain toisen laitteen konfigurointiesimerkki.

```
1:Lenny:nvram# slotsegs[4] set 32
```

Koska laitteistot eivät olleet täysin identtisiä, Lenny antoi luoda vain 30 segmenttiä normaalin 32 sijaan, vaikka komennolla 1 luotiin 32 segmenttiä korttipaikkaan 4. Erot näkyvät komennolla 2 ja 3. Molemmissa keskittimissä on ATM-segmenttien (4.x) lisäksi neljä Ethernet-segmenttiä (1.x). Carlin ATM-segmentit alkavat numerolla 7, koska kahta viimeistä Ethernet-segmenttiä ei ole varattu, vaikka ne fyysisesti ovatkin olemassa. Lennyn 30 ATM-segmentistä ensimmäinen on numero 5, koska Ethernet-segmenttejä on vain neljä.

```
2:Carl:system# config
```

```
Accelerator board is present. Accelerator IOP is being used.
```

```
Installed DRAM Size: 32 MB
```

```
tty1: 9600 baud
```

```
tty2: 1200 baud
```

```
PE: slot 5
```

```
PM1: present and good
```

```
PM2: not present
```

```
PM3: not present
```

```
PM4: not present
```

```
04/07 OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF
```

```
OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF
```

```
OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF
```

```
OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF
```

```
OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF
```

```
OC3-MF OC3-MF
```

```
01/01 100TX 100TX 100TX 100TX ???? ????

```



```

3:Lenny:system# config
No accelerator board. Using IOP on the packet engine.
Installed DRAM Size: 32 MB
tty1: not set - using 9600 baud
tty2: 1200 baud
PE: slot 5
PM1: present and good
PM2: not present
PM3: not present
PM4: not present
  04/05 OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF
        OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF
        OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF
        OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF
        OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF OC3-MF
        ----
01/01 100TX 100TX 100TX 100TX ----

```

Sillattu yhteys luodaan konfiguroimalla segmentti käyttämään siltausta komennolla 4, jossa 4.1 tarkoittaa korttipaikassa 4 olevan ATM-moduulin ensimmäistä virtuaalisegmenttiä, määräämällä PVC:t sisään ja ulos komennoilla 5 ja 6, joissa tulo-PVC on 32 ja lähtö-PVC 33, sekä käynnistämällä siltaus komennolla 7 samassa moduulissa. Portti täytyy olla avattu myös Bridge-alijärjestelmässä komennolla 8. Komennot 9 ja 10 annetaan kytkimessä virtuaalikanavien luomiseksi, joista ensimmäinen luo lähtevän kanavan portista 1C1 porttiin 1C2 virtuaalipolussa 0 ja toinen tulevan kanavan vastakkaiseen suuntaan. Portit on esitetty BNP-muodossa, jossa B(oard) on kytkinmatriisi, N(etwork Module) verkkomoduuli ja P(ort) portti. ASX-200BX- ja ASX-200BW-kytkimissä matriiseja on vain yksi. VPT:t ovat jo olemassa, koska kytkimen palauttaminen tehdasasetuksille alustamalla CDB (Configuration Database) jättää jokaiseen porttiin elastisen VPT:n, jonka kaistanleveyttä rajoittaa vain linkin nopeus. Ping-komennon jälkeen Moelta Otolle komennolla 12 nähdään lähetetyt ja vastaanotetut paketit, joita on ARP-liikenne mukaan lukien yhteensä 12. Komennot 5 ja 6 täytyy antaa sillan vastapäässä niin, että vastaanotto tapahtuu samassa PVC:ssä kuin lähetys alkupäässä. Jotta konfiguraatio säilyisi uudelleenkäynnistyksen yli, on se tallennettava komennolla 13, jossa cfg on oletustiedostonimi konfiguraatiolle sisäisessä muistissa, josta se luetaan uudelleenkäynnistyksessä.

```

4:Carl:atm# protocol sset bridge-encap 4.1
5:Carl:atm/1483bridged# inpvc sset 32 4.1

```

```

6:Carl:atm/1483bridged# outpvc sset 33 4.1
7:Carl:atm/1483bridged# senable 4.1
8:Carl:bridge# bridging penable 4.1

9:Homer::configuration vcc> new lc1 0 33 lc2 0 33
10:Homer::configuration vcc> new lc2 0 32 lc1 0 32

11:Moe> ping 193.166.74.193

Pinging 193.166.74.193 with 32 bytes of data:

Reply from 193.166.74.193: bytes=32 time<1ms TTL=64
Reply from 193.166.74.193: bytes=32 time<1ms TTL=64
Reply from 193.166.74.193: bytes=32 time<1ms TTL=64
Reply from 193.166.74.193: bytes=32 time<1ms TTL=64

Ping statistics for 193.166.74.193:
    Packets: Sent = 4, Received = 4, Lost = 0 (0%
    loss),
Approximate round trip times in milli-seconds:
    Minimum = 0ms, Maximum = 0ms, Average = 0ms

12:Lenny:atm/1483bridged# config 4.1
RFC-1483 encapsulation information for port 4.1
    In PVC VCI:                33
    Out PVC VCI:               32

    Total Pkts sent:           6
    Total Pkts rcvd:           6
    Pkts rcvd with unknown type: 0
    Pkts rcvd with unknown protocol: 0
    Pkts rcvd with length too big: 0

13:Carl:system# savecfg cfg

```

Siltausesimerkkiä jatkettiin luomalla toinen ATM-segmentti, sille omat PVC:t, ja kumpikin segmentti sijoitettiin omaan VLAN:iin eri aliverkkoon komennoilla 14 - 20. VLAN luodaan antamalla sille nimi ja siihen kuuluvat portit. Tässä ATM-segmentit on lisätty luontivaiheessa komennoilla 17 ja 19 ja Ethernet-segmentit myöhemmin komennoilla 21 ja 22. VLAN vaatii myös liitännän. Tässä edellä käytetty verkko on jaettu kahteen aliverkkoon komennoilla 18 ja 20. Toiselle keskittimelle määrätyt osoitteet näkyvät komennoissa 23 ja 24. Koska nyt laitteiden välillä on useampi kuin yksi reitti, on ainakin toisessa oltava Spanning-Tree käynnissä komennolla 25 silmukoiden estämiseksi. Nyt päätelaitteissa voitiin määrätä, kummassa keskittimessä reititys tapahtuu muuttamalla oletusreitintä yhteydelle

Moelta Otolle. Tässä tapauksessa Lenny reitittää riippumatta siitä, kummassa keskittimessä päätelaitteet ovat kiinni. Ensin molemmat ovat Lennyn alla, Moe VLAN:ssa Marketing ja Otto VLAN:ssa Advertising, minkä jälkeen Moe siirretään Carlin alle. Komennossa 27 Moen oletusreitittimestä mennään edestakaisin, jos Lennyllä ei ole Oton osoitetta ARP-tilustaan. Komentoja vastaava verkko on kuviossa 41.

```

14:Carl:atm# protocol sset bridge-encap 4.2
15:Carl:atm/1483bridged# inpvc sset 34 4.2
16:Carl:atm/1483bridged# outpvc sset 35 4.2
17:Carl:ip# vlan add marketing 4.1
18:Carl:ip# interface add marketing 193.166.74.1/25
19:Carl:ip# vlan add advertising 4.2
20:Carl:ip# interface add advertising 193.166.74.254/25
21:Carl:ip# vlan tadd marketing 1.1
22:Carl:ip# vlan tadd advertising 1.2

23:Lenny:ip# interface add marketing 193.166.74.126/25
24:Lenny:ip# interface add advertising
193.166.74.129/25
25:Lenny:bridge# spantree enable

26:Moe> tracert 193.166.74.193

Tracing route to 193.166.74.193 over a maximum of 30
hops

    1    <1 ms    <1 ms    <1 ms    193.166.74.126
    2    <1 ms    <1 ms    <1 ms    193.166.74.193

Trace complete.

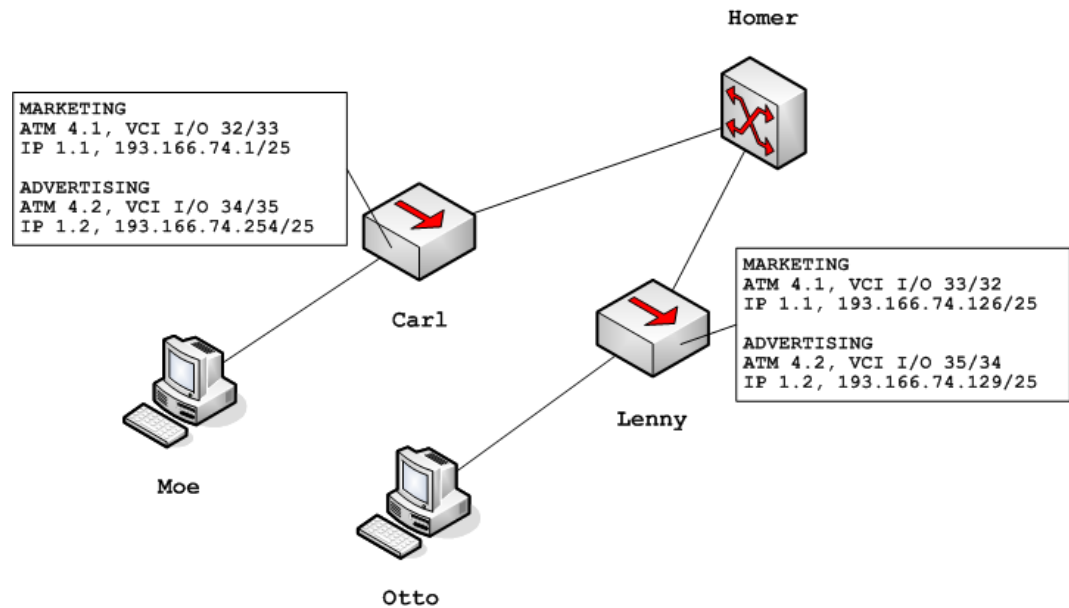
27:Moe> tracert 193.166.74.193

Tracing route to 193.166.74.193 over a maximum of 30
hops

    1    <1 ms    <1 ms    <1 ms    193.166.74.126
    2    <1 ms    <1 ms    <1 ms    193.166.74.126
    3    <1 ms    <1 ms    <1 ms    193.166.74.193

Trace complete.

```



KUVIO 41. Sillattu 1483

4.3 Reititetty 1483

ATM-segmentit voidaan muuttaa reitittäviksi komennolla 28. Segmenteistä luodaan komennoilla 29 ja 30 PVC:t VCI-arvoilla 94 ja 193 niille määrätyistä osoitteista niiden päätelaitteille. Komennoissa on annettu kohdeosoitteina toimivat päätelaitteiden osoitteet. Lähdeosoitteina toimivat edellä komennoilla 18 ja 20 luodut VLAN-osoitteet. Komennolla 31 käynnistetään reititys. Tämä toimii jo, kun verkot ovat suoraan kiinni samassa keskittimessä ja PowerCell 700 -ATM-moduuli toimii reitittimenä niiden välillä. Jos toinen verkoista siirretään eri keskittimen taakse, täytyy keskittimien väliin luoda kolmas VLAN ja ellei reititysprotokollaa käytetä staattiset reitit sen kautta verkkojen välille komennoilla 32 - 34. Komennolla 34 reitti kulkee Carlilta verkkoon 193.166.74.128, johon sillä ei enää ole suoraa yhteyttä, Lennylle määrätyn yhdysverkon 193.166.75.0 yhdyskäytävän kautta. Yhteydet kytkimiin ja kytkinten välille muodostetaan SVC:illä automaattisesti. Nyt molemmilla päätelaitteilla on omat PVC:t ATM-verkkoon. Jos sillatussa tilanteessa päätelaitteet olisivat olleet samassa VLAN:ssa tai kuten ensin olivatkin samassa segmentissä ilman VLAN:ia, ne olisivat käyttäneet yhteisiä PVC:itä. Kun Moe ja Otto olivat siltausesimerkissä eri VLAN:eissa eri keskittimien alla, ne

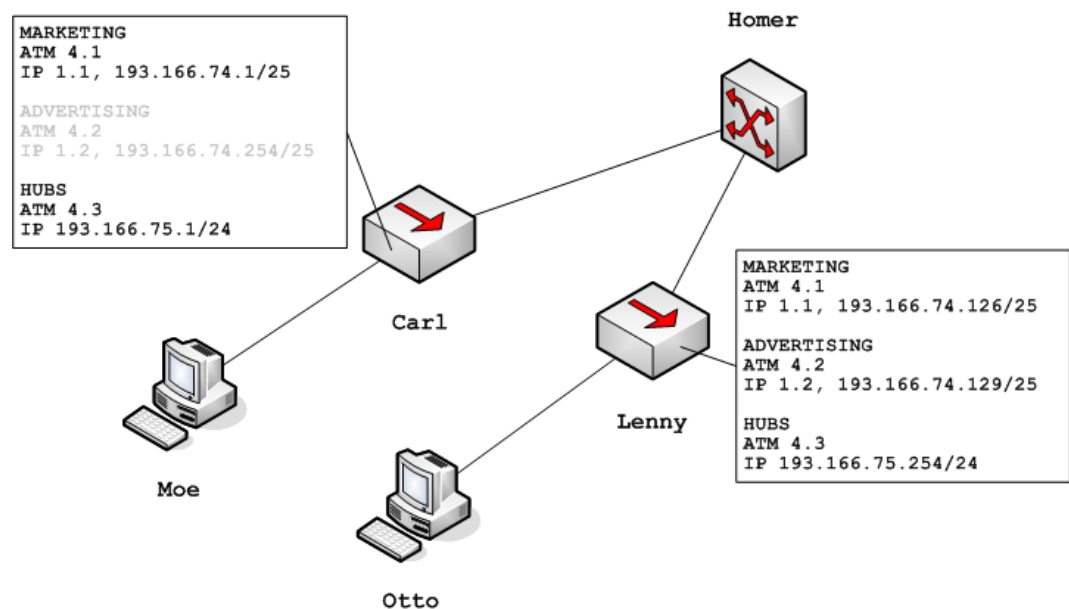
käyttivät silloinkin samoja PVC:itä, koska sama keskitin reititti molempien liikenteen. Komentoja vastaava verkko on kuviossa 42.

```

28:Carl:atm# protocol sset routed-1483 4.1,4.2
29:Carl:atm/1483routed# sset 94 193.166.74.94 4.1
30:Carl:atm/1483routed# sset 193 193.166.74.193 4.2
31:Carl:atm/1483routed# senable 4.1,4.2

32:Carl:ip# vlan add hubs 4.3
33:Carl:ip# interface add hubs 193.166.75.1
34:Carl:ip# route add 193.166.74.128/25 193.166.75.254
metric 1

```

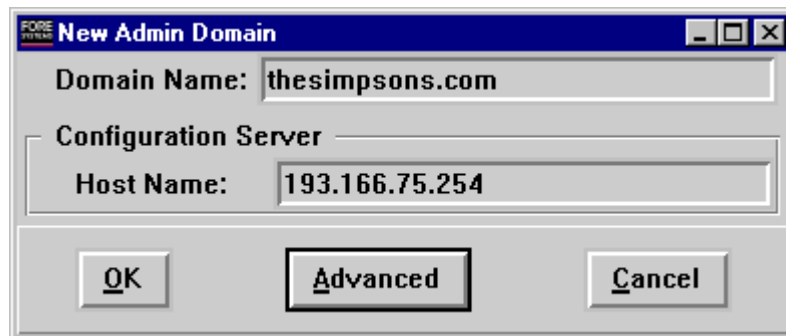


KUVIO 42. Reititetty 1483

4.4 LAN Emulation

ELAN:n konfiguroinnissa käytettiin ForeView VLAN Manager 4.3 -ohjelmistoa, joka on graafinen työkalu. Näin saatiin valmis LECS-konfigurointitiedosto muokattavaksi. Ensin luotiin domain kuviossa 43 valitsemalla File-valikosta "Create Admin Domain". Konfigurointipalvelimien osoitteena käytetty 193.166.75.254 on vain kytkimien ie0-porteille konfiguroinnin ajaksi annettu IP-osoite. Valitsemalla Advanced nähdään konfigurointipalvelimen NSAP-osoite kuviossa 44. Osoitteen

viimeisellä tavulla erotetaan LECS ja LES/BUS-parit toisistaan. LECS-asetuksia ei ole muutettu ja oletus-ELAN poistetaan ennen kuin uusi luodaan, koska se on avoin ja tässä on tarkoitus testata ELAN-pääsynhallintaa. Uusi ELAN luotiin valitsemalla VLAN-valikosta ”Create”, antamalla sille nimi kuviossa 45 ja määrittämällä se suljetuksi kuviossa 46. Keskittimet ja päätelaitteet määritettiin IP- ja MAC-osoitteiden perusteella valitsemalla Member-valikosta ”Create” kuvioissa 47 - 50. Ne täytyy vielä erikseen määrätä ELAN:iin drag-and-drop-toiminnolla. Kuvioissa 51 ja 52 näkyy toisen kytkimen konfigurointi niiltä osin kuin se eroaa edellisestä. Konfigurointitiedostot ovat alkuperäisinä ja muokattuina liitteissä 2 - 5.



KUVIO 43. Uusi domain ja sen konfigurointipalvelin Homer

Create New Domain (Advanced)

Config Servers

HostName	NSAP	
193.166.75.254	47000580FFE100000F21A3C210020481A3C21	03 ↓

CS Parameters

VCC Timeout Period: 1200
 Reload Period: 30
 Permanent Circuits:
 MAC Address Base:

Default ELAN

Type: Ethernet 802.3
 Frame Size: 1516
 LES HostName: 193.166.75.254
 LES NSAP: 47000580FFE100000F21A3C210020481A3C21 02 ↓
 BUS HostName: 193.166.75.254
 BUS NSAP: 47000580FFE100000F21A3C210020481A3C21 02 ↓
 Show NSAP

OK Cancel Help

KUVIO 44. Konfigurointipalvelin Homer ja poistettava oletus-ELAN

Create VLAN

VLAN Name: marketing

OK Advanced... Cancel

KUVIO 45. Uusi ELAN

Create VLAN (Advanced)

VLAN Type: ELAN 802-style VLAN Hybrid VLAN

ELAN Parameters

Type: Operational Mode:

Frame Size:

LES HostName:

LES NSAP:

BUS HostName:

BUS NSAP:

Show NSAP

802-style VLAN Parameters

VLAN Type:

IP Subnet:

Protocol:

MAC Address:

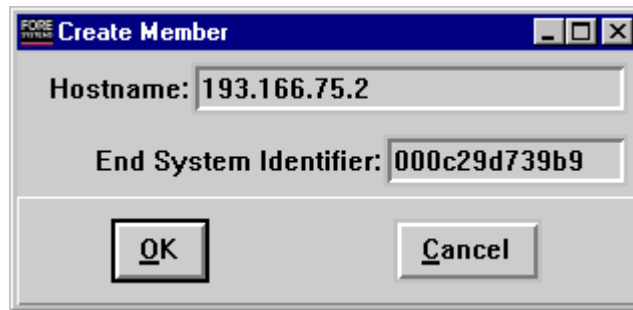
KUVIO 46. Uusi ELAN Marketing ja sen LES/BUS-pari Homer

Create Member

Hostname:

End System Identifier:

KUVIO 47. Carl



The screenshot shows a dialog box titled "Create Member" with a blue header bar. The "Hostname" field contains the IP address "193.166.75.2" and the "End System Identifier" field contains the hexadecimal value "000c29d739b9". At the bottom, there are two buttons: "OK" and "Cancel".

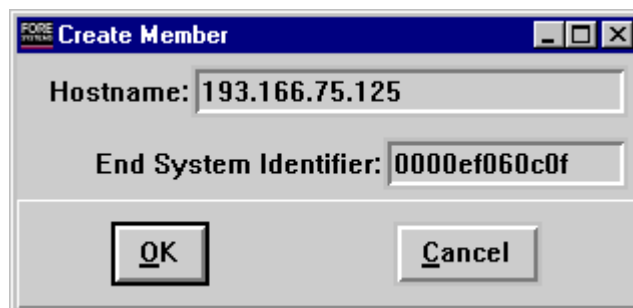
FORE POWER Create Member

Hostname: 193.166.75.2

End System Identifier: 000c29d739b9

OK Cancel

KUVIO 48. Moe



The screenshot shows a dialog box titled "Create Member" with a blue header bar. The "Hostname" field contains the IP address "193.166.75.125" and the "End System Identifier" field contains the hexadecimal value "0000ef060c0f". At the bottom, there are two buttons: "OK" and "Cancel".

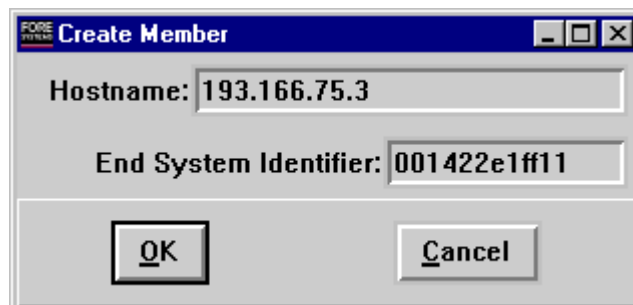
FORE POWER Create Member

Hostname: 193.166.75.125

End System Identifier: 0000ef060c0f

OK Cancel

KUVIO 49. Lenny



The screenshot shows a dialog box titled "Create Member" with a blue header bar. The "Hostname" field contains the IP address "193.166.75.3" and the "End System Identifier" field contains the hexadecimal value "001422e1ff11". At the bottom, there are two buttons: "OK" and "Cancel".

FORE POWER Create Member

Hostname: 193.166.75.3

End System Identifier: 001422e1ff11

OK Cancel

KUVIO 50. Otto

FORE Create New Domain (Advanced)

Config Servers

HostName	NSAP
193.166.75.254	47000580FFE100000F21A2EC90020481A2EC9

CS Parameters

VCC Timeout Period: 1200
Reload Period: 30
Permanent Circuits:
MAC Address Base:

Default ELAN

Type: Ethernet 802.3
Frame Size: 1516
LES HostName: 193.166.75.254
LES NSAP: 47000580FFE100000F21A2EC90020481A2EC9 02 ↓
BUS HostName: 193.166.75.254
BUS NSAP: 47000580FFE100000F21A2EC90020481A2EC9 02 ↓
 Show NSAP

KUVIO 51. Konfigurointipalvelin Barney ja poistettava oletus-ELAN

Create VLAN (Advanced)

VLAN Type: ELAN 802-style VLAN Hybrid VLAN

ELAN Parameters

Type: Operational Mode:

Frame Size:

LES HostName:

LES NSAP:

BUS HostName:

BUS NSAP:

Show NSAP

802-style VLAN Parameters

VLAN Type:

IP Subnet:

Protocol:

MAC Address:

KUVIO 52. Uusi ELAN Marketing ja sen LES/BUS-pari Barney

Koska tarkoituksena on käyttää DLE:tä, poistetaan edellä luodut LES/BUS-parit ja luodaan uudet molemmissa kytkimissä komennolla 35. Kuten graafisesti edellä komento vaatii Selector-tavun LES/BUS-osoitteelle ja ELAN:n nimen, jota palvelin palvelee. Koska nyt palvelimia on enemmän kuin yksi, käytetään yksilöllistä anycast-osoitetta, jolla viitataan kaikkiin vertaispalvelimiin, jotka määritetään komennossa viimeisenä. Keskitimissä annetaan komento 36 ELAN:iin liittymiseksi käyttäen edellä luotua anycast-osoitetta. Kytkimet liitetään ELAN:iin komennolla 37. Huomioitavaa komennossa on eri Selector-tavu LEC:lle kuin LES/BUS-parille komennossa 35. Nyt luotu e11-liitäntä on LANE-liikenteelle. Edellä käytetty hallintaliitäntä ei voi olla samassa aliverkossa. Käytettäessä DLE:tä LEC ottaa yhteyden LES/BUS-palveluun ohittaen LECS:n. Päätelaitteiden liittämiseksi

samaan ELAN:iin annetaan keskittimissä komennot 38 ja 39. Toisen puolen laitteille täytyy vain antaa eri IP-osoitteet samasta aliverkosta kuin tässä on annettu. Komennolla 40 nähdään, kuinka LANE on läpinäkyvä päätelaitteille, vaikka yhteys kulkee kahden keskittimen ja yhden kytkimen kautta. Jos Homer putoaa verkosta, ELAN elpyy vaihtaen kuviossa 40 katkoviivalla merkittyihin varayhteyksiin.

```
35:Homer::configuration lane les> new 00 marketing
-anycast ffffffffffffffffffffffffffffffffffffffff
-peers
0x47.0005.80.ffe100.0000.f21a.3c21.0020481a3c21.00
0x47.0005.80.ffe100.0000.f21a.2ec9.0020481a2ec9.00
36:Carl:atm/lane# elan add 4.1 marketing la
ffffffffffffffffffffffffffffffffffffffff
37:Homer::configuration lane lec> new 01 marketing
-ip 193.166.75.254 -mask 255.255.255.0 manual -les
ffffffffffffffffffffffffffffffffffffffff
38:Carl:ip# vlan add marketing 1.1,4.1
39:Carl:ip# interface add marketing 193.166.75.126/24

40:Otto> tracert 193.166.75.1
```

Tracing route to 193.166.75.1 over a maximum of 30 hops

```
 1    <1 ms    <1 ms    <1 ms    193.166.75.1
```

Trace complete.

Luomalla toinen ELAN komennoilla 41 - 45 keskitin reitittää määrittämällä sen päätelaitteen oletusreitittimeksi, jonka osoite näkyy komennolla 46. Toisella ELAN:lla on oma nimensä ja anycast-osoitteensa, sen LES/BUS-palvelu ja LEC on erotettu ensimmäisen ELAN:n vastaavista eri Selector-tavuilla ja sillä on oma el-liitäntänsä. Keskittimissä se käyttää omaa ATM-segmenttiään, joka on eri aliverkossa kuin ensimmäisen ELAN:n päätelaitteet.

```
41:Barney::configuration lane les> new 02 advertising
-anycast eeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeee
-peers
0x47.0005.80.ffe100.0000.f21a.2ec9.0020481a2ec9.02
0x47.0005.80.ffe100.0000.f21a.3c21.0020481a3c21.02
42:Lenny:atm/lane# elan add 4.2 advertising la
eeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeee
43:Barney::configuration lane lec> new 04 advertising
```

```

-ip 193.166.76.253 -mask 255.255.255.0 manual -les
eeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeeee
44:Lenny:ip# vlan add advertising 1.2,4.2
45:Lenny:ip# interface add advertising
193.166.76.125/24

```

```
46:Moe> tracert 193.166.76.3
```

Tracing route to 193.166.76.3 over a maximum of 30 hops

```

  1      1 ms      <1 ms      <1 ms      193.166.75.125
  2     <1 ms     <1 ms     <1 ms     193.166.76.3

```

Trace complete.

ELAN-pääsynhallinta aktivoidaan komennolla 47. Komennossa käytetty osoite on LANE 2.0 -määrittelyn mukainen LECS:n wka (well-known address), jota LES indeksillä 1 käyttää varmistaakseen asiakaskoneen oikeuden liittyä ELAN:iin Marketing. Oikeus myönnetään asiakkaan NSAP- tai MAC-osoitteella Accept-parametrissa LECS-konfigurointitiedostossa. Normaalisti osoitteeksi kirjoitetaan ”wka” (ilman lainausmerkkejä), mutta epäselvyyksien välttämiseksi osoite on kirjoitettu auki, koska keskittimet käyttävät LANE 1.0 -määrittelyn mukaista osoitetta oletuksena ja vaikka kytkimet vaihtavatkin vanhaan osoitteeseen tarvittaessa. Muokatuissa konfigurointitiedostoissa liitteissä 4 ja 5 näkyvät osoitteet on selvitetty kappaleen lopussa. Huomattavaa osoitteissa on se, että Moen osoite on vaihtunut, koska VLAN Manager oli asennettu virtuaalikoneeseen. Barneyn osoite ei ole välttämätön LANE-yhteydelle kytkimen läpi, mutta LEC:tä luotaessa samalla syntyvä el-liitäntä on.

```
47:Barney::configuration lane les> security 1 enable
0xc5.0079.00.000000.00000000000000a03e000001.00
```

```

Carl      47000580ffe1000000f21a2ec90000ef071ad400
Lenny    47000580ffe1000000f21a2ec90000ef060c0400
Barney    0020481a2ec9
Moe      0007e9199bde
Otto     001422e1ff11

```

4.5 Classical IP

Koska Lennyn resurssit eivät riittäneet MPC:n luomiseksi, MPOA:ta ei pystytty testaamaan. Toisaalta MPOA olisi vielä vaatinut vähintään yhden reitittävän laitteen (kolmannen PowerHubin) lisää, jota ei ollut käytettävissä. CLIP jäi myös keskeneräiseksi, koska päätelaitteille ei saanut NSAP-osoitetta ilman ATM-verkkokorttia ja -ajuria. Komennoilla 48 - 54 yhteyden saa kuitenkin muodostettua keskittimien välille. Komennoilla 48 ja 49 IP-liitännät muutetaan NBMA-tyypiksi ja komennoilla 50 ja 51 ATM-protokolla CLIP:ksi. Komennolla 52 määritetään ATM ARP -palvelimen osoite, joka on Barney'n qaa0-portin osoite, ja komennolla 53 käynnistetään CLIP. Kytkimen qaa-portti täytyy nostaa ylös komennolla 54.

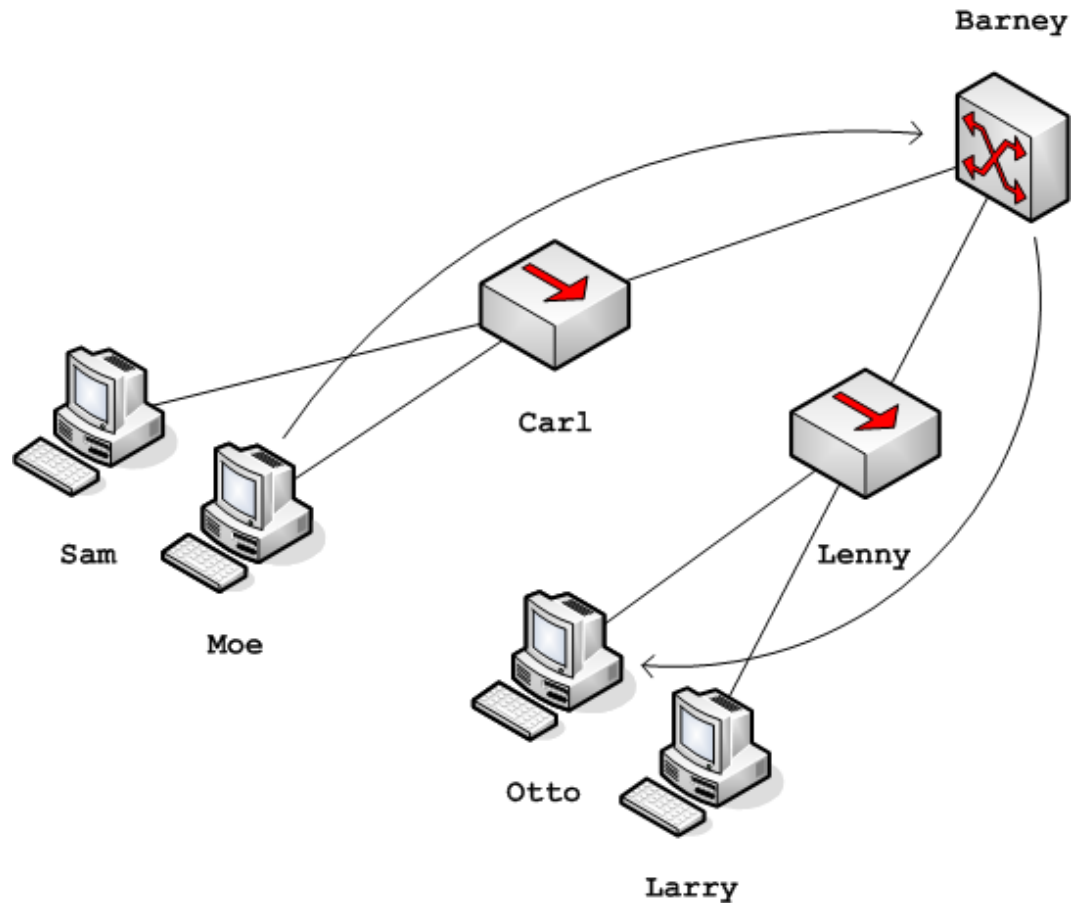
```
48:Carl:ip# interface delete marketing 193.166.75.126
49:Carl:ip# interface add marketing 193.166.75.126/24
iftype nbma
50:Carl:atm/lane# elan delete marketing
51:Carl:atm# protocol sset classical-ip 4.1
52:Carl:atm/clip# atmarp-addr sset
47000580ffe100000f21a2ec90020481a2ec900 4.1
53:Carl:atm/clip# senable 4.1
54:Barney::configuration ip> address qaa0
193.166.75.254 255.255.255.0 up
```

MPLS:ää ei myöskään pystytty testaamaan, koska tuki sille tuli vasta Fore-Thought-ohjelmistoversioon 8.0, joka olisi vaatinut laitteistoltakin enemmän.

4.6 Quality of Service

Palvelun laadun testaamiseksi verkkolaitteet palautettiin siltausesimerkin aikaiseen tilanteeseen ja suoratoistettiin (streaming) videotiedostoa Barney'n läpi päätelaitteelta toiselle kuvion 53 mukaisesti käyttäen VideoLAN:n VLC 0.8.6d media player -ohjelmistoa. Videona käytettiin DVD:ltä (MPEG-2-pakattu) siirrettyä videodataa (720 x 576 pikseliä, 25 fps, korkeintaan 9,8 Mbps). Videon jokainen kuva merkittiin, jotta siirrettyä videota voitaisiin myöhemmin analysoida. Merkintää

varten pakkaus täytyi väliaikaisesti purkaa, mutta palautettiin sen jälkeen. Myös ääni purettiin ja pakattiin takaisin, vaikka tässä ei sitä testattukaan.

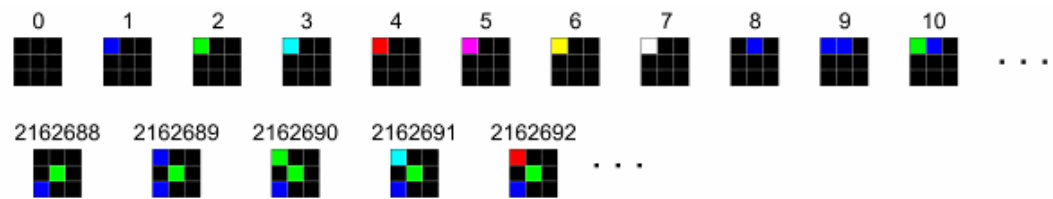


KUVIO 53. Streaming

Merkinnässä käytettiin Intelin Video GED 0.4 -ohjelmistoa. Lähdevideo täytyi muuntaa RGB-väriavaruuden mukaiseksi myöhempää käsittelyä varten, joten Video GED käytti myös samaa avaruutta. Kuviossa 54 näkyvät käytetyt värit ja kuviossa 55 niiden ryhmittäminen vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas.



KUVIO 54. Paletti (Intel 2007)



KUVIO 55. Värien painoarvot (Intel 2007)

Kuvioissa 56 ja 57 näkyy merkintä käytännössä. Tiedonsiirron jälkeen tallennettua videota analysoimalla pystyttiin osoittamaan, olivatko kaikki kuvat siirtyneet, kopioitumatta ja oikeassa järjestyksessä. Video siirrettiin RTP:llä TS-muodossa (Transport Stream) ja muutettiin vastaanotettaessa takaisin PS-muotoon (Program Stream), joka on tarkoitettu luotettavammille medioille kuin TS. Saadessaan riittävän määrän näytteitä, joita tässä siirrettiin viisi minuuttia, Video GED antaa tuloksen (Mean Opinion Score) perustuen Intelin tutkimustuloksiin taulukon 3 mukaisesti.



KUVIO 56. Alkuperäinen kuva

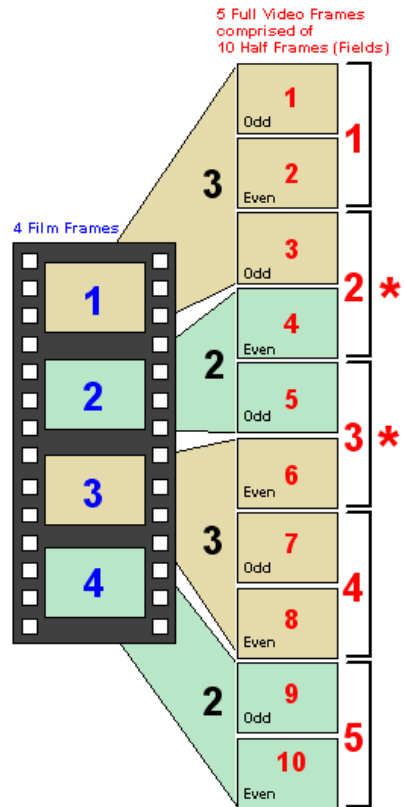


KUVIO 57. Merkitty ja uudelleenpakattu kuva

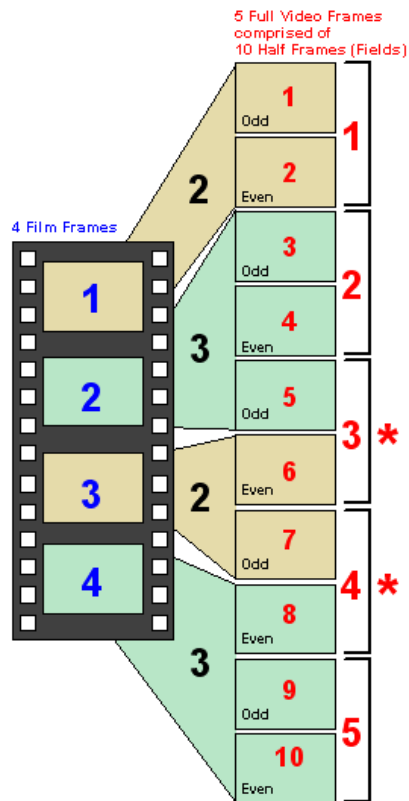
TAULUKKO 3. MOS ja käyttäjäkokemus (Intel 2007)

MOS	Käyttäjäkokemus
5	Ei havaittavia keskeytyksiä
4	Keskeytykset havaittavia, eivät häiritseviä
3	Keskeytykset vähän häiritseviä
2	Keskeytykset hyvin häiritseviä
1	Keskeytykset erittäin häiritseviä

Tätä kirjoitettaessa käytetty Video GED ei tunnistanut itse asettamaansa merkkiä, jonka jälkeen analysointi olisi pitänyt aloittaa. Ennen merkkiä oli lisättävä kaksi tyhjää kuvaa, joten ensimmäinen analysoitava kuva oli numero 3. Kuvia 0 ja 1 ei oteta huomioon ja kuva 2 sisältää vain kontrollimerkin. Tällä merkillä voidaan erottaa erisisältöiset videot toisistaan samassa tiedostossa. Toinen ongelma oli toinen pakkausvaihe siirrettävän tiedoston koon pienentämiseksi. MPEG-2-pakkaus lisää tiedostoon ohjaustietoa, jota Video GED käyttää ulkoisen purkuohjelman välityksellä analysoidessaan sitä. Ohjaustieto korjaa videon nopeuden. Eri televisiojärjestelmät toimivat eri taajuuksilla (eri nopeuksilla) kuin projektorit elokuvateattereissa. Jos lähdevideo olisi ollut NTSC-formaatissa, sen nopeus olisi korjattu 3:2 pulldown -tekniikalla. Menetelmä aiheuttaa vääristymiä ja nykimistä kuvan liikkuessa, mutta tässä se on selitetty, koska kopioituneet kuvat vaikuttavat MOS-arvoon. Kuviossa 58 on esitetty 3:2 pulldown, jossa 4 filmikuvaa muutetaan 10 videopuolikuvaksi. NTSC on lomitettu eli jokainen videokuva koostuu kahdesta puolikuvasta ja kumpikin puolikuva videokuvan joko parittomista tai parillisista vaakajuovista. Ensimmäinen filmikuva toistetaan kolmesti ensimmäisen videokuvan molempina puolikuvina ja toisen videokuvan ensimmäisenä puolikuvana, toinen filmikuva kahdesti toisen videokuvan toisena puolikuvana ja kolmannen videokuvan ensimmäisenä puolikuvana jne. Tähdellä merkityissä videokuvissa yhdistyy kaksi filmikuvaa, mikä aiheuttaa vääristymiä, jos kuvassa tapahtuu nopeita muutoksia. Menetelmä voi olla myös 2:3 pulldown (kuvio 59), jossa ensimmäinen filmikuva toistetaan kahdesti, toinen kolmesti jne.



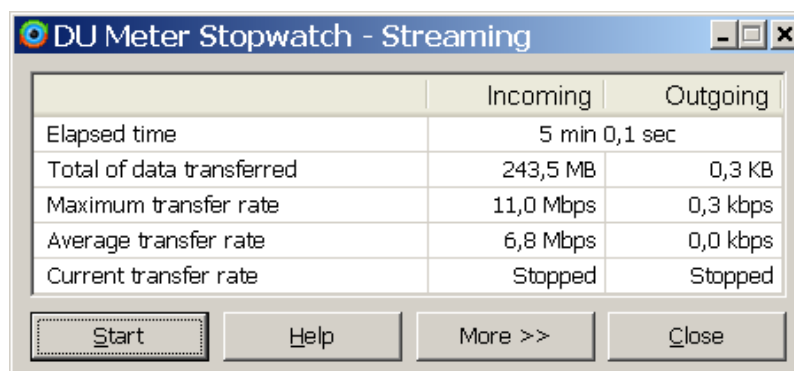
KUVIO 58. 3:2 pulldown (The Computer Language Company Inc. 2008)



KUVIO 59. 2:3 pulldown (The Computer Language Company Inc. 2008)

Kun neljästä kuvasta on tehty viisi, tarkoittaa se käytännössä, että analysoitavassa siirretyssä tiedostossa joka viides kuva on kopio edellisestä. Video GED osaa erillisellä työvaiheella poistaa kuvat, joilla on sama värikoodi kuin edellisellä kuvalla, mutta tätä varten tiedosto on purettava. Nyt pakkauksen on oltava purettu ennen operaation aloittamista. Jos kopioituneita kuvia ei poistettaisi, siirretty tiedosto ei voisi ylittää MOS-arvoa 2,48. Tämä ajallinen korjaus (temporal alignment) korjaa myös pudonneet kuvat, joten se antaa silti vääriä tuloksia. Suomessa käytössä oleva PAL-formaatti vain lomittaa filmikuvat ja näyttää ne nopeammin. Tämä nopeus vaikuttaa jo äänenkorkeuteenkin, mutta nyt vältytään kopioituneiden kuvien aiheuttamilta ongelmilta sekä ylimääräisiltä purku- ja pakkausvaiheilta.

Ensin video siirrettiin käyttäen UBR-palveluluokkaa, jotta saatiin käsitys sen synnyttämästä bittivirrasta. Siltausesimerkissä luotu virtuaalikanava käyttää oletuksena UBR:ää, koska sille ei määrätty UPC-indeksiä. Kuviossa 60 näkyy maksimibittivirta 11,0 Mbps ja keskimääräinen bittivirta 6,8 Mbps. Näitä arvoja ei voida kuitenkaan suoraan käyttää luotaessa UPC-sopimusta, mikä näkyy taulukossa 4. Jotta kuvion 60 nopeudet saavutettaisiin verkkokerroksella, on paketit ehdittävä segmentoida ja solut koottava uudelleen taulukon 4 solutason tiedonsiirron lisäksi.



	Incoming	Outgoing
Elapsed time	5 min 0,1 sec	
Total of data transferred	243,5 MB	0,3 KB
Maximum transfer rate	11,0 Mbps	0,3 kbps
Average transfer rate	6,8 Mbps	0,0 kbps
Current transfer rate	Stopped	Stopped

Start Help More >> Close

KUVIO 60. MPEG-2-pakatun videon synnyttämä bittivirta

UPC-sopimusta VBR-palveluluokalle luotaessa komento vaatii PCR-, SCR- ja MBS-arvon. Tässä käytettiin taulukon 1 VBR1-skeemaa vastaavaa sopimusta eli toisessa ämpäriässä testataan kaikki solut. Jos solu tai solupurske ylittää PCR-nopeuden tai purskeen enimmäiskoon MBS, se hylätään. Virtuaalikanavaa ei voi

luoda PCR-arvolla 0. Jos joko SCR tai MBS on 0, GCRA menee pois päältä eli soluja ei testata. Jos PCR = SCR, MBS on merkityksetön, koska nopeus ei ylitä SCR:ää. Arvoja ei voi valita mielivaltaisesti, koska ne riippuvat toisistaan kaavan

$$BT = (MBS - 1) \left(\frac{1}{SCR} - \frac{1}{PCR} \right)$$

mukaisesti. BT:llä on maksimi-arvo, johon UNI:ssä lisätään vielä CDVT. Tämä summa on L(imit), joka vastaa toisen ämpäriin suurinta mahdollista tilavuutta, kun siihen lisätään I(ncrement), joka on SCR. Ämpäri tyhjenee nopeudella SCR ja jokaisen solun kohdalla tarkastetaan, onko raja-arvo L ylitetty. Jos ei ole, solu päästetään läpi ja ämpäri (laskuri) asetetaan arvoon L + I, muuten solu hylätään. Laskurin uusi arvo on edellisen hyväksytyin solun aikainen arvo, johon on lisätty I ottaen huomioon tyhjeneminen, joka on tapahtunut solujen saapumisaikojen välillä. Jos soluja lähetetään hitaammin kuin SCR tai ei lähetetä ollenkaan, on mahdollista lähettää purske nopeudella PCR kunnes raja-arvo taas saavutetaan. Tiedonsiirron alussa ämpäri on tyhjä. Ensimmäisen ämpäriin vastaavat parametrit ovat I = PCR ja L = CDVT. CDVT antaa anteeksi liian nopealle solulle hylkäämättä sitä annetuissa rajoissa. Tässä porttien CDVT on jätetty oletusarvoon 250 µs. VPT:iden QoS-parametrit on oletusarvoisesti jätetty määrittämättä.

Jos QoS-parametrit (CTD, CDV ja CLR) määritettäisiin, se tehtäisiin eri liikennetyypeille erikseen dynaamisille yhteyksille QoS Expansion -tauluun ja staattisille QoS Extension -tauluun. Sitä ennen olisi testattava verkon suorituskyky, johon vaikuttavat fyysisen median pituus ja laatu, kytkinarkkitehtuurin, kuten kytkinmatriisin ja puskuroinnin toiminta kuormituksen ollessa suuri, puskurin kapasiteetti, liikennemäärä, verkkosolmujen määrä yhteydellä ja niiden mahdolliset toimintahäiriöt. Parametrien määrittämisen jälkeen QoS-taulu määrätään VPT:lle. Määrittämätön QoS-luokka hyväksyy minkä tahansa arvon kaikille parametreille. VPT:tä luotaessa voidaan dynaamista yhteyttä estää käyttämästä sitä perustuen yhteyden liikennetyyppiin. Koska nyt QoS-parametreja ei määritetty ja VPT:t ja VCC:t olivat jo olemassa, riitti UPC-sopimuksen luominen ja sen määrääminen VCC:lle. Komennolla 55 muutettiin UPC:n käyttämät yksiköt soluista sekunnissa kilobitteihin sekunnissa. Liikennesopimus luotiin komennolla 56, jossa ensim-

mäinen numero on sopimuksen indeksi ja seuraavat PCR-, SCR- ja MBS-arvo. Indeksii 0 on määrittämätön UBR-oletussopimus, jota käytetään, jos muuta indeksii ei ole annettu. Komennolla 57 ja 58 VCC:t muutettiin käyttämään indeksii 1 indeksin 0 sijaan, jolloin vanhat täytyi ensin poistaa. VCC:ssä liikenteenvalvonasta johtuen mahdollisesti hylätyt solut näkyvät komennolla 59. Jos soluja putoaisi ruuhkasta johtuen, se näkyisi komennolla 60 ja 61. Nollatakseen tilastotiedot kytkein on uudelleenkäynnistettävä tai poistettava vanha VCC ja luotava uusi.

```
55:Barney:: configuration system> units kbps
56:Barney::configuration upc> new 1 vbr 11000 6800
14000
57:Barney::configuration vcc> new 1c1 0 33 1c2 0 33
-upc 1
58:Barney::configuration vcc> new 1c2 0 32 1c1 0 32
-upc 1
59:Barney::statistics> vcc 1c1
60:Barney::statistics> vcc traffic 1c1
61:Barney::statistics> port traffic 1c1
```

Taulukon 4 arvoihin päädyttiin lisäämällä ensin SCR:ään 1 Mbps kerrallaan ja kasvattamalla MBS:ää vastaavasti suurimpaan mahdolliseen arvoonsa kunnes SCR olisi ylittänyt PCR:n ja MBS saavutti arvon 250 Mb. Oli selvää, että rajoittava tekijä oli PCR, koska muuten dataa tuli läpi vain 1 kilotavu. Muutoksen vastaanotettujen pakettien määrässä huomasi vasta PCR:n ollessa 40 Mbps. Kun yhtään solua ei enää pudonnut ja tulos saatiin kaksi kertaa peräkkäin, MBS ja SCR asetettiin arvoihin 1 Mb ja 10 Mbps arvoista 250 Mb ja (PCR – 1) Mbps, minkä jälkeen niihin lisättiin 1 - 2 Mb(s) kerrallaan kunnes yhtään solua ei enää pudonnut ja tulos saatiin kaksi kertaa peräkkäin.

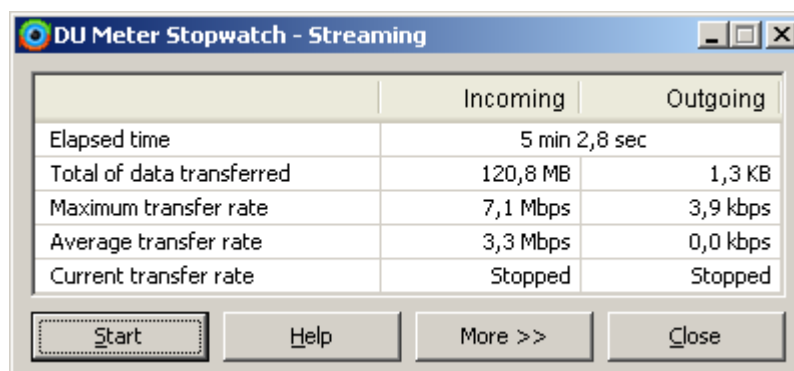
Tässä on pyritty välttämään videon laadun subjektiivista arviointia tulosten toistomahdollisuuden säilyttämiseksi. On kuitenkin selvää, ettei kaistanleveysparametrien ja hylättyjen solujen suhde ole vakio eikä analysointituloksiinkaan voi sokeasti luottaa. Jos kuvaan tulee häiriö kuviossa 57 vasemmassa yläkulmassa olevan merkin päälle, sen painoarvo voi muuttua odottamattomalla tavalla. Liitteessä 6 on esimerkki tilanteesta, jossa painoarvo hyppää arvosta 1162 arvoon 5772. Video GED:n tulostama tieto on CSV-muodossa (Comma-Separated Values) ja kuvan painoarvo on kolmas muuttuja. Kaksi ensimmäistä muuttujaa ovat laskureita,

joista ensimmäinen aloittaa vain ensimmäisestä aloitusmerkistä ja toinen uudelleen alusta myös seuraavista, jos tiedosto sisältää useamman videon. Neljäs muuttuja kertoo kuvan tyyppin, esimerkiksi 0x000001 on normaali (virheetön) kuva, viides muuttuja virheen vakavuuden, esimerkiksi kun kuvan painoarvo on sama kuin edellisen kuvan, se asetetaan arvoon 1 yhden kopioituneen kuvan merkiksi, ja viimeiset yhdeksän muuttujaa värikoodit, jotka muutetaan lähimpään palettiväriin, minkä jälkeen lasketaan kuvan painoarvo (kolmas muuttuja). Virheen vakavuus on $V_n - V_{n-1} - 1 = 5772 - 1162 - 1 = 4609$, vaikka kysymys olisi yhdestä rikkoutuneesta kuvasta ja sen seurauksena muuttuneesta painoarvosta. Nyt täytyy muistaa, että paketit (1336 tavua) koostuvat useista soluista, joiden hyötykuorma on vain 48 tavua. Toisaalta häiriö voi olla vaikuttamatta merkkiin, jolloin kuva on edelleen virheellinen, mutta ohjelma näkee sen virheettömänä. Häiriö voi tapahtua ylempänä protokollapinossa eli tiedosto voi silti olla virheellinen, vaikka soluja ei olisi pudonnutkaan. Jos kuvan painoarvo pienenee, se lasketaan yhdeksi OoS-virheeksi (Out of Sequence), vaikka arvo pienenisikin enemmän kuin yhdellä. Video GED ei huomioi pudonneita kuvia, jos virheen vakavuus ylittää arvon 99999,9. Todellinen pudonneiden kuvien lukumäärä on laskettu vähentämällä tiedoston kuvien lukumäärä tiedonsiirron jälkeen kuvien lukumäärästä ennen tiedonsiirtoa ja lisäämällä tähän kopioituneiden kuvien lukumäärä. Tulokseen on lisätty myös Video GED:n ilmoittamat pudonneet kuvat ja OoS-virheet, minkä jälkeen on laskettu korjattu MOS. Tämä on edelleen epäedullista MOS-arvon suhteen, koska osa pudonneista kuvista tulee lasketuksi kahteen kertaan. Toisaalta painoarvoon vaikuttamattomat häiriöt jäävät huomaamatta ilman subjektiivista arviointia. Video GED pystyi analysoimaan vain 2140 kuvaa virheettömän tiedoston 7507 kuvasta SCR-arvolla 10 Mbps koko tiedostosta eikä laskettu MOS-arvo ollut vertailukelpoinen. Subjektiivinen MOS-arvo laskee 1 - 2 numeroa, kun häiriöt ovat satunnaisia ja vain osassa kuvaa; kolme numeroa, jos häiriöt ovat säännöllisiä ja ääni katkeilee; ja neljä numeroa, jos video katkeilee. MOS-arvolla 1 häiriöt ovat satunnaisempia kuin arvolla 2, mutta esiintyvät rykelmissä aiheuttaen häiriöitä koko kuvaan ja keskeytyksiä sanan varsinaisessa merkityksessä ymmärrettävyyteen. Soluja lähetettiin likimäärin 5,401 miljoonaa eli pahimmassakin tapauksessa niistä hylättiin alle 2 %.

TAULUKKO 4. Lasketut ja subjektiiviset MOS-arvot

PCR (Mbps)	SCR (Mbps)	MBS (Mb)	Hylätyt solut	MOS, korjattu	MOS, subj.
40	39	250	7503	3.25	2
50	49	250	4903	3.42	2
60	59	250	835	4.46	3
70	69	250	404	4.56	3
80	79	250	150	4.57	4
90	89	250	23	4.74	4
92	91	250	20	4.74	4
93	92	250	0	4.74	5
93	92	1	36	4.74	4
93	92	2	0	4.74	5
93	10	2	92356	VIRHE	1
93	12	2	12	4.69	4
93	14	2	6	4.59	4
93	15	2	0	4.60	4

Vertailun vuoksi kuviossa 61 on puoleen MPEG-2-pakatun videon maksimibittivirrasta 9,8 Mbps ja keskimääräisestä bittivirrasta 6,15 Mbps lasketun MPEG-4-pakatun saman videon synnyttämä maksimibittivirta 7,1 Mbps ja keskimääräinen bittivirta 3,3 Mbps tiedonsiirron kehystämistä johtuva kustannus mukaan luetuna. Taulukossa 5 on MPEG-4-videon virheettömään siirtoon vaaditut kaistanleveysparametrit.



	Incoming	Outgoing
Elapsed time	5 min 2,8 sec	
Total of data transferred	120,8 MB	1,3 KB
Maximum transfer rate	7,1 Mbps	3,9 kbps
Average transfer rate	3,3 Mbps	0,0 kbps
Current transfer rate	Stopped	Stopped

Start Help More >> Close

KUVIO 61. MPEG-4-pakatun videon synnyttämä bittivirta

TAULUKKO 5. MPEG-4-pakatun videon kaistanleveysparametrit

PCR (Mbps)	SCR (Mbps)	MBS (Mb)	Hylätyt solut
40	39	125	279
50	49	125	158
60	59	125	27
70	69	125	5
73	72	125	3
74	73	125	0
74	73	1	0
74	10	1	8
74	11	1	1
74	12	1	0

Lopuksi tässä on huomioita liikennetyyppien välisestä vuorovaikutuksesta. Siirrettäessä videota Moelta Otolle kuvion 53 mukaisesti ja saturoimalla linkki UBR-liikenteellä Samilta Larrylle ja mahdollisesti vielä toisella UBR-yhteydellä kahden muun päätelaitteen välillä ei ole ollenkaan mahdotonta, että toinen UBR-yhteys menee poikki ja VBR-yhteys hylkää soluja, vaikka sille olisikin varattu riittävästi kaistanleveyttä. On syytä muistaa, että vain kytkimien välisen yhteyden kaistanleveys videolle on taattu. Reitti lähteeltä keskittimen kautta kytkimen tuloporttiin sisältää AAL5-linkin keskittimen ja kytkimen välillä ja vastaavasti kytkimen lähtöportin ja keskittimen välillä reitillä kohdepäätelaitteelle. Kytkimessä UBR-liikenne voidaan muuttaa ABR-liikenteeksi, jolloin sitä voidaan rajoittaa ennen kuin linkki saturoituu. Jos VBR-yhteydet ylittävät VPT:n kaistanleveyden, voidaan käyttää kaistanleveyden tai puskurin ylivarausta. Nämä toimivat kuitenkin vain kytkinten välisillä yhteyksillä. Liikenteen rajoittaminen ABR-sopimuksella tarkoittaa, että sen noudattamista on valvottava, mikä puolestaan tarkoittaa, että muuten rajoittamattoman bittivirran solu hylätään aina sen ollessa liian nopea. Videon siirrossa, jossa käytettiin UDP:tä, paketti lähetettiin vain kerran, mutta FTP-tiedonsiirrossa, joka käyttää TCP:tä, sama paketti lähetetään uudelleen. Vaikka ABR:ssä ja TCP:ssä on ruuhkanhallinta sisäänrakennettuna, liikennettä on hyvä rajoittaa jo palvelimessa, jotta vältytään turhilta uudelleenlähetysten uudelleenlähetyksiltä. VPT:n kaistanleveyttä rajoitetaan eli tehdään siitä ei-elastinen komenolla 62 käyttäen Reserved-parametria kilobiteissa sekunnissa. ABR-sopimus vaa-

tii PCR- ja MCR-arvon, joista vain MCR:ää rajoittaa VPT:n Reserved-parametri, koska PCR:ää ei ABR:lle taata. Komennossa 63 MCR on 5 Mbps.

```
62:Barney::configuration vpt> modify lc1 0 -reserved  
10000  
63:Barney::configuration upc> new 2 abr 10000 5000
```

5 YHTEENVETO

LAN-emulointitekniikoista LANE testattiin suunnitelmien mukaan. CLIP jäi keskenräiseksi ja MPOA kokonaan testaamatta laiteresurssien puuttuessa. LANE tarjoaa paremman LAN-emuloinnin kuin CLIP, kuten broadcast-liikenteen ja VLAN:t verkkokerroksella, joten se on ilmeinen valinta LAN-emulointiin. MPOA olisi ollut hyödyllinen lisäominaisuus LANE:en, mutta sen testaaminen olisi vaatinut enemmän verkkolaitteita kuin oli käytettävissä. Myös PNNI oli käsitelty vain teoriaosassa, koska sen testaamiseksi olisi vaadittu laajempi verkko. Laboratorioverkon koko vaikutti myös palvelun laadun testaukseen. Tässä liikenteen tuottaminen oli vaikeampaa kuin esimerkiksi tiedostopalvelimen testaaminen kuormittamalla sitä virtuaalisesti tuotetulla liikenteellä. Nyt voi näyttää siltä kuin yksi vuokuluttaisi kohtuuttomasti kaistanleveyttä. Samaan aikaan olisi voinut siirtää useamman vuon, koska VBR-lähteet lähettävät vaihtelevalla bittivirralla. Konfigurointiohje ehdottaa ylivarauksen alkuarvoksi 500 - 700 %, joka ei ole mahdoton saadut tulokset huomioon ottaen, joiden mukaan yhden vuon virheetön siirto vaatii likimäärin 520 % PCR/SCR-suhdetta. Toisaalta nyt ei testattu vain kuinka paljon kaistanleveyttä videon virheetön siirto vaatii, vaan myös miten solujen putoaminen vaikuttaa videon laatuun. Käytetystä pakkausalgoritmista ja siitä minkälaisista sisältöä sillä pakataan riippuu, kuinka paljon dataa jää siirrettäväksi ja soluja putoaa käyttöasteen pysyessä samana. Nopeasti muuttuvan kuvan tallentaminen vaatii enemmän bittejä ja siirtäminen enemmän kaistanleveyttä kuin kuvan, joka muuttuu vain osittain, mikä vaikuttaa kanavoitavien videon määrään. Pahin puute ja samalla suurin jatkotutkimushaaste on MPLS. Tässä sitä ei testattu, koska tuki sille tuli vasta myöhemmässä ohjelmistoversiossa.

Palvelun laadun testauksessa oli tarkoitus luottaa siinä käytetystä ohjelmasta saattuihin mittaustuloksiin, mutta lopulta päädyttiin subjektiiviseen arviointiin, koska ohjelma tulkitsi virheitä sattumanvaraisesti ja epätäydellisesti. Tulosten toistamiseksi suositellaan sokkotestien suorittamista. Verrattuna likimäärin 4,5 Mbps siirtonopeuden vaativaan DVB-T-signaaliin tässä käytetyn videon bittivirta oli suurempi. Bittivirtaa voitaisiin vielä laskea käyttämällä uudempia pakkausalgoritmeja. Suositeltavaa olisi pyrkiä vähintään MOS-arvoon 4. Kun yhden algoritmin antama MOS-arvo on saatu, voidaan toista algoritmia verrata ensimmäiseen objek-

tiivisesti. Yksi vaihtoehto on Semacan VQLab-ohjelmisto, joka mittaa kohinan määrää videokuvissa ja niiden vastaavuutta verrattuna kontrollivideoon. Koska VQLab:n ilmainen koeversio antoi tiedot vain 25 ensimmäisestä kuvasta eli tässä tapauksessa vain ensimmäisen sekunnin ajalta, se on mainittu vain jatkotutkimusta ajatellen. Esittämättä johtopäätöksiä algoritmien laadusta tulosten perusteella vaadittu kaistanleveys laski likimäärin 20 % siirrettävän videon bittivirran puolittuessa eli ATM-tiedonsiirron kustannus on otettava huomioon bittivirrasta huolimatta.

Ilmeinen jatkotutkimushaaste on MPLS. ATM, sillattu ja reititetty 1483-kapelointi voivat olla kotikäyttäjälle tuttuja ADSL-reitittimen asetuksista, mutta tietoliikennealan yritysten operaattoreille myymät verkkolaitteet ja niiden käyttöjärjestelmät ovat IP/MPLS-pohjaisia. Nyt käyttöliittymät ovat jo graafisia. Testaamalla mitä pinnan alla tapahtuu päivittää työn 2000-luvulle.

Toinen jatkotutkimushaaste on tiedonsiirron kapasiteetin ylivoimaisuus. Tämän kautta työ voidaan ulottaa videon ja äänen pakkausalgoritmeihin ja parantaa sen yleistettävyyttä. Resurssien säästäminen, on se sitten kaistanleveyttä tai muistia, laadun alenematta ihmisaistein havaittuna on jatkuva haaste verkon kautta jaettaville videopalveluille varsinkin matkapuhelinverkoissa, joissa verkon kaistanleveys ja päätelaitteiden muisti on rajoittuneempi kuin langallisten tietoverkkojen ja niiden langattomien vastineiden. Suomessa kaupallinen tilausvideopalvelu toimii jo operaattoreiden hitaimmalla tavallisesti tarjoamalla 1 Mbps ADSL-yhteydellä. Jos video vielä siirretään normaalisti CBR-muodossa ilman VBR-liikenteen ylivoimaisuudesta, voidaan testata ylivoimaisuuden vaikutusta kanavoitujen videon määrään. Tämä yleistettävyyden paraneminen vaikuttaa toisaalta myös työn soveltamisalan laajuuteen, kun otetaan huomioon algoritmien tehokkuus eri sisältöjen pakkauksessa, mikä ei kuulunut tämän ATM-tekniikkaan keskittyneen työn piiriin.

LÄHTEET

Alvarez, S. 2006. QoS for IP/MPLS Networks. Indianapolis: Cisco Press.

Cisco. 2001. Dictionary of Internetworking Terms and Acronyms [verkkojulkaisu]. [viitattu 8.12.2007].

<http://www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/cisintwk/ita/index.htm>

Cisco. 2006. Internetworking Technologies Handbook [verkkojulkaisu]. [viitattu 22.7.2007].

http://www.cisco.com/en/US/tech/tk1330/tsd_technology_support_technical_reference_chapter09186a00804ff81c.html

The Computer Language Company Inc. 2008. The Computer Desktop Encyclopedia [verkkojulkaisu]. [viitattu 12.1.2008].

http://www.pcmag.com/encyclopedia_term/0%2C2542%2Ct%3Dtelecine&i%3D52669%2C00.asp

FORE Systems. 1998. ForeRunner ASX-200WG, ASX-200BX, and ASX-1000 ATM Switch Installation and Maintenance Manual [verkkojulkaisu]. [viitattu 22.7.2007]. <ftp://ftp.lanwan.fi/>

Guichard, J., Le Faucheur, F. & Vasseur, J. 2005. Definitive MPLS Network Designs. Indianapolis: Cisco Press.

Intel. 2007. Video Gross Error Detection [verkkojulkaisu]. [viitattu 11.11.2007]. <http://softwarecommunity.intel.com/articles/eng/1202.htm>

Lucek, J. & Minei, I. 2005. MPLS-Enabled Applications: Emerging Developments and New Technologies. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

Marconi. 2002a. Multiservice Broadband Switch Network Configuration Manual ForeThought 8.1.x [verkkojulkaisu]. [viitattu 22.7.2007]. <ftp://ftp.lanwan.fi/>

Marconi. 2002b. Multiservice Broadband Switch MPLS Configuration Manual ForeThought 8.1.x [verkkojulkaisu]. [viitattu 22.7.2007]. <ftp://ftp.lanwan.fi/>

Morrow, M. & Sayeed, A. 2007. MPLS and Next-Generation Networks. Indianapolis: Cisco Press.

Perros, H. 2005. Connection-oriented Networks: SONET/SDH, ATM, MPLS, and optical networks. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

Vatiainen, H., Harju, J., Koivisto, H., Saaristo, S. & Vihervaara, J. 1999. Multi-Protocol over ATM (MPOA) Performance Tests [verkkojulkaisu]. [viitattu 12.2.2008]. <http://atm.tut.fi/faster/mpoa/eunice-final.pdf>

Basic software capabilities

Basic software capabilities are provided at no cost with each switch via the base license, which includes hardware drivers for switch control processors (SCPs), embedded Web and SNMPv1 device management, and single emulated LAN (ELAN) LANE support. A ForeThought license is required for ATM signaling and routing functionality, as well as support for network modules, port cards, and other ForeThought value-add enhancements. A brief description of each ForeThought package follows. Please reference the license matrix for detailed information.

ForeThought solution packages

- Enterprise (EN) – This license package is targeted for small- and medium-size enterprise networks. It includes LANE and other LAN interworking capabilities, as well as support for all ATM service categories and basic UNI and PNNI routing and signaling.

- Extended Enterprise (EX) – Large enterprises will benefit from the additional performance and scalability features in this package. It provides H-PNNI as well as more secure management via Kerberos and SecureID.
- Service Provider (SP) – This package is optimized for service providers, giving them the tools they need to operate large multiservice networks. Carrier-class redundancy and resiliency features are added here, as are enhanced routing and signaling (including virtual UNI) and support for SPVCs.
- Gold (G) – This package includes all the ATM features supported by the switch.

Please reference the ForeThought license matrix for a complete listing of the features available within each license package.

ForeThought license matrix

	Base	EN	EX	SP	G
Hardware and redundancy support					
All available SCPs for this platform	•	•	•	•	•
All available network modules for this platform (except the modules specifically mentioned below)	•	•	•	•	•
ASX4000/ASX4000M system hardware redundancy				•	•
SONET automatic protection switching (APS) and SDH multiplex section protection (MSP)				•	•
ASX4000/ASX4000M timing with timing control module (TCM), Stratum 3E			•	•	•
Bidirectional APS on ASX4000/ASX4000M Series 2 port cards					•
Channelized multiservice network modules					
Channelized DS-3 Frame Relay/CEM/ATM/IMA			•	•	•
Channelized OC-3c CEM network module			•	•	•
Channelized OC-3 ATM/IMA network module			•	•	•
Serial network module (4-port)	•	•	•	•	•
Management and configuration					
Setup wizard	•	•	•	•	•
Basic device management (SNMP, Web)	•	•	•	•	•
SecureID			•	•	•
Kerberos			•	•	•
Network Time Protocol (NTP)			•	•	•
Call and performance records				•	•
ATM remote monitoring (RMON)			•		•
Static IP routing for CEC-Plus				•	•
Call screening			•	•	•
SCP IP filters			•	•	•
ACLs			•	•	•
G.826				•	•
SNMPv3			•	•	•
RADIUS Authentication Client		•	•	•	•
Multiple Telnet sessions		•	•	•	•
Java™ graphing applet					•
SSHv2			•	•	•
3DES for SNMPv3			•	•	•
AES for SNMPv3			•	•	•
IPv6 management plane support					•
Telecordia® GR-815-CORE support				•	•

EN: Enterprise License
 EX: Extended Enterprise License
 SP: Service Provider License
 G: Gold License

ForeThought license matrix (continued)

	Base	EN	EX	SP	G
ATM circuit management					
UNI 3.0, 3.1, 4.0		•	•	•	•
UNI 4.0 Supplementary Services			•	•	•
UNI 4.0 Proxy Signaling			•	•	•
UNI 4.0 Virtual UNI				•	•
UBR, CBR, nrt-VBR		•	•	•	•
ABR (Series D)		•	•	•	•
Load balancing (UBR, CBR, VBR)			•	•	•
PVC/PVP preservation				•	•
Link capacity reporting				•	•
IISP		•	•	•	•
PNNI: single peer group		•	•	•	•
PNNI: 2-node split switch			•	•	•
PNNI: >3-node split switch			•	•	•
Control Plane Security			•	•	•
PGL H-PNNI			•	•	•
PVC provisioning	•	•	•	•	•
SVP, SPVPs, SPVCs				•	•
Point-to-multipoint SPVCs				•	•
SVx call preservation				•	•
View QoS of SVCs		•	•	•	•
AINI				•	•
CBR underbooking				•	•
NCCI				•	•
Connection Trace				•	•
Path Trace				•	•
CUGs				•	•
Policed UBR				•	•
TNS				•	•
Connection modify – PVx and SPVx				•	•
DPS (source/destination SPVx redirection – point-to-point and multipoint)				•	•
LAN internetworking					
Single LANE services	•	•	•	•	•
Multiple LANE services		•	•	•	•
Distributed LANE services		•	•	•	•
LANE registration checkback		•	•	•	•
CLIP ARP server		•	•	•	•
Spanning Tree		•	•	•	•
MPOA client			•	•	•

EN: Enterprise License
 EX: Extended Enterprise License
 SP: Service Provider License
 G: Gold License

287 01-FGC 101 0154
 © Ericsson Inc. 2006 – All Rights Reserved

No part of this document may be reproduced in any form without the written permission of the copyright owner. The contents of this document are subject to revision without notice due to continued progress in methodology, design and manufacturing. Ericsson shall have no liability for any error or damage of any kind resulting from the use of this document.

Ericsson
 5000 Marconi Drive
 Warrendale PA 15086-7502
 USA
 Phone: 724-742-4444
 Toll free: 1-866-627-2664
 www.ericsson.com

SecurID is a registered trademark of RSA Security Inc.
 Kerberos is a trademark of the Massachusetts Institute of Technology (MIT).
 Java is a trademark of Sun Microsystems, Inc.
 Telcordia is a registered trademark of Telcordia Technologies Inc.
 All trademarks are properties of their respective owners.

ForeThought, ASX, and TNX are trademarks of Ericsson Inc.

ALKUPERÄINEN LECS.CFG, HOMER

[ELAN]

```
.Aging_Time:      300
.Connection_Complete_Timer:  4
.Expected_LE_ARP_Response_Time:  1
.Flush_TimeOut:      4
.Forward_Delay_Time:      15
.LAN_Type:      Ethernet/IEEE 802.3
.Maximum_Frame_Size:      1516
.Maximum_Retry_Count:      1
.Maximum_Unknown_Frame_Count:      1
.Maximum_Unknown_Frame_Time:  1
.Multicast_Send_VCC_Type:      Best Effort
.Path_Switching_Delay:      6
.VCC_TimeOut_Period:      1200
Match.Ordering:      marketing
marketing.BUS_Address:
    47000580FFE1000000F21A3C210020481A3C2100
marketing.BUS_Machine_Name:  193.166.75.254
marketing.Machine_Name:  193.166.75.254
marketing.LAN_Name:      marketing
marketing.LAN_Type:      Ethernet/IEEE 802.3
marketing.Address:
    47000580FFE1000000F21A3C210020481A3C2100
marketing.Maximum_Frame_Size:  1516
0000ef071ad100.Machine_Name:  193.166.75.126
0000ef071ad100.LAN_Name:      marketing
000c29d739b900.Machine_Name:  193.166.75.2
000c29d739b900.LAN_Name:      marketing
marketing.Accept:  0000ef071ad1XX, 000c29d739b9XX
```

[VLAN_MANAGER]

```
.Domain:  thesimpsons.com
.Machine:  NT
.Time:    Thu Nov 01 00:00:00 GTB Daylight Time 2007
.User:    Administrator
.Version: (LE) Configuration Server Config version
2.0
```

[CONFIG_SERVER]

```
LECS.Reload_Period:      30
LECS.VCC_TimeOut_Period:  1200
```

[CONFIG_SERVER_VM]

```
193.166.75.254.CS_Name:  193.166.75.254
```

193.166.75.254.LECS_Address:
47000580FFE1000000F21A3C210020481A3C2103

[MANAGED_MACHINES]

193.166.75.126.ESI: 0000ef071ad1
193.166.75.126.Machine_Type: FOREATMADAPTER
193.166.75.126.state: AVAILABLE
193.166.75.2.ESI: 000c29d739b9
193.166.75.2.Machine_Type: FOREATMADAPTER
193.166.75.2.state: AVAILABLE
193.166.75.254.ATM_Connected: TRUE
193.166.75.254.ESI: 0020481A3C21
193.166.75.254.Machine_Subtype: asx200bx
193.166.75.254.Machine_Type: FOREATMSWITCH
193.166.75.254.NSAP:
47000580FFE1000000F21A3C210020481A3C2100
193.166.75.254.state: Service

ALKUPERÄINEN LECS.CFG, BARNEY

[ELAN]

```
.Aging_Time:      300
.Connection_Complete_Timer:  4
.Expected_LE_ARP_Response_Time:  1
.Flush_TimeOut:      4
.Forward_Delay_Time:      15
.LAN_Type:      Ethernet/IEEE 802.3
.Maximum_Frame_Size:      1516
.Maximum_Retry_Count:      1
.Maximum_Unknown_Frame_Count:      1
.Maximum_Unknown_Frame_Time:  1
.Multicast_Send_VCC_Type:      Best Effort
.Path_Switching_Delay:      6
.VCC_TimeOut_Period:      1200
Match.Ordering:      marketing
marketing.BUS_Address:
    47000580FFE1000000F21A2EC90020481A2EC900
marketing.BUS_Machine_Name:  193.166.75.254
marketing.Machine_Name:  193.166.75.254
marketing.LAN_Name:      marketing
marketing.LAN_Type:      Ethernet/IEEE 802.3
marketing.Address:
    47000580FFE1000000F21A2EC90020481A2EC900
marketing.Maximum_Frame_Size:  1516
0000ef060c0f00.Machine_Name:  193.166.75.125
0000ef060c0f00.LAN_Name:      marketing
001422e1ff1100.Machine_Name:  193.166.75.3
001422e1ff1100.LAN_Name:      marketing
marketing.Accept:  0000ef060c0fXX, 001422e1ff11XX
```

[VLAN_MANAGER]

```
.Domain:  thesimpsons.com
.Machine:  NT
.Time:    Thu Nov 01 00:00:00 GTB Daylight Time 2007
.User:    Administrator
.Version: (LE) Configuration Server Config version
2.0
```

[CONFIG_SERVER]

```
LECS.Reload_Period:      30
LECS.VCC_TimeOut_Period:  1200
```

[CONFIG_SERVER_VM]

```
193.166.75.254.CS_Name:  193.166.75.254
```

193.166.75.254.LECS_Address:
47000580FFE1000000F21A2EC90020481A2EC903

[MANAGED_MACHINES]

193.166.75.125.ESI: 0000ef060c0f
193.166.75.125.Machine_Type: FOREATMADAPTER
193.166.75.125.state: AVAILABLE
193.166.75.254.ATM_Connected: TRUE
193.166.75.254.ESI: 0020481A2EC9
193.166.75.254.Machine_Subtype: asx200wg
193.166.75.254.Machine_Type: FOREATMSWITCH
193.166.75.254.NSAP:
47000580FFE1000000F21A2EC90020481A2EC900
193.166.75.254.state: Service
193.166.75.3.ESI: 001422e1ff11
193.166.75.3.Machine_Type: FOREATMADAPTER
193.166.75.3.state: AVAILABLE

MUOKATTU LECS.CFG, HOMER

[ELAN]

```
.Aging_Time:      300
.Connection_Complete_Timer:      4
.Expected_LE_ARP_Response_Time:  1
.Flush_TimeOut:      4
.Forward_Delay_Time:      15
.LAN_Type:      Ethernet/IEEE 802.3
.Maximum_Frame_Size:      1516
.Maximum_Retry_Count:      1
.Maximum_Unknown_Frame_Count:      1
.Maximum_Unknown_Frame_Time:      1
.Multicast_Send_VCC_Type:      Best Effort
.Path_Switching_Delay:      6
.VCC_TimeOut_Period:      1200
Match.Ordering:      marketing
marketing.BUS_Address:
    47000580FFE1000000F21A3C210020481A3C2100
marketing.BUS_Machine_Name:      193.166.75.254
marketing.Machine_Name:      193.166.75.254
marketing.LAN_Name:      marketing
marketing.LAN_Type:      Ethernet/IEEE 802.3
marketing.Address:
    47000580FFE1000000F21A3C210020481A3C2100
marketing.Maximum_Frame_Size:      1516
0000ef071ad100.Machine_Name:      193.166.75.126
0000ef071ad100.LAN_Name:      marketing
000c29d739b900.Machine_Name:      193.166.75.2
000c29d739b900.LAN_Name:      marketing
marketing.Accept:
47000580ffe1000000f21a2ec90000ef071ad400,
47000580ffe1000000f21a2ec90000ef060c0400, 0007e9199bde,
001422e1ff11
```

[VLAN_MANAGER]

```
.Domain:      thesimpsons.com
.Machine:      NT
.Time:      Thu Nov 01 00:00:00 GTB Daylight Time 2007
.User:      Administrator
.Version:      (LE) Configuration Server Config version
2.0
```

[CONFIG_SERVER]

```
LECS.Reload_Period:      30
LECS.VCC_TimeOut_Period:      1200
```

[CONFIG_SERVER_VM]

193.166.75.254.CS_Name: 193.166.75.254
193.166.75.254.LECS_Address:
47000580FFE1000000F21A3C210020481A3C2103

[MANAGED_MACHINES]

193.166.75.126.ESI: 0000ef071ad1
193.166.75.126.Machine_Type: FOREATMADAPTER
193.166.75.126.state: AVAILABLE
193.166.75.2.ESI: 000c29d739b9
193.166.75.2.Machine_Type: FOREATMADAPTER
193.166.75.2.state: AVAILABLE
193.166.75.254.ATM_Connected: TRUE
193.166.75.254.ESI: 0020481A3C21
193.166.75.254.Machine_Subtype: asx200bx
193.166.75.254.Machine_Type: FOREATMSWITCH
193.166.75.254.NSAP:
47000580FFE1000000F21A3C210020481A3C2100
193.166.75.254.state: Service

MUOKATTU LECS.CFG, BARNEY

[ELAN]

```
.Aging_Time:      300
.Connection_Complete_Timer:  4
.Expected_LE_ARP_Response_Time:  1
.Flush_TimeOut:      4
.Forward_Delay_Time:      15
.LAN_Type:      Ethernet/IEEE 802.3
.Maximum_Frame_Size:      1516
.Maximum_Retry_Count:      1
.Maximum_Unknown_Frame_Count:      1
.Maximum_Unknown_Frame_Time:  1
.Multicast_Send_VCC_Type:      Best Effort
.Path_Switching_Delay:      6
.VCC_TimeOut_Period:      1200
Match.Ordering:      marketing
marketing.BUS_Address:
    47000580FFE1000000F21A2EC90020481A2EC900
marketing.BUS_Machine_Name:  193.166.75.254
marketing.Machine_Name:  193.166.75.254
marketing.LAN_Name:      marketing
marketing.LAN_Type:      Ethernet/IEEE 802.3
marketing.Address:
    47000580FFE1000000F21A2EC90020481A2EC900
marketing.Maximum_Frame_Size:  1516
0000ef060c0f00.Machine_Name:  193.166.75.125
0000ef060c0f00.LAN_Name:      marketing
001422e1ff1100.Machine_Name:  193.166.75.3
001422e1ff1100.LAN_Name:      marketing
marketing.Accept:  0020481a2ec9,
47000580ffe1000000f21a2ec90000ef071ad400,
47000580ffe1000000f21a2ec90000ef060c0400, 0007e9199bde,
001422e1ff11
```

[VLAN_MANAGER]

```
.Domain:  thesimpsons.com
.Machine:      NT
.Time:  Thu Nov 01 00:00:00 GTB Daylight Time 2007
.User:  Administrator
.Version:      (LE) Configuration Server Config version
2.0
```

[CONFIG_SERVER]

```
LECS.Reload_Period:      30
LECS.VCC_TimeOut_Period:      1200
```

[CONFIG_SERVER_VM]

193.166.75.254.CS_Name: 193.166.75.254
193.166.75.254.LECS_Address:
47000580FFE1000000F21A2EC90020481A2EC903

[MANAGED_MACHINES]

193.166.75.125.ESI: 0000ef060c0f
193.166.75.125.Machine_Type: FOREATMADAPTER
193.166.75.125.state: AVAILABLE
193.166.75.254.ATM_Connected: TRUE
193.166.75.254.ESI: 0020481A2EC9
193.166.75.254.Machine_Subtype: asx200wg
193.166.75.254.Machine_Type: FOREATMSWITCH
193.166.75.254.NSAP:
47000580FFE1000000F21A2EC90020481A2EC900
193.166.75.254.state: Service
193.166.75.3.ESI: 001422e1ff11
193.166.75.3.Machine_Type: FOREATMADAPTER
193.166.75.3.state: AVAILABLE

OTE VIDEO GED:n TULOSTAMASTA CSV-MUOTOISESTA TIEDOSTA

```
00001490,00001490,00001490,0x000001,00000.0,0x03fc03,0x00fe01,0xfdfefd,0x00fe01,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000
00001491,00001491,00001491,0x000001,00000.0,0x01fedf,0x00fe01,0xfdfefd,0x00fe01,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000
00001492,00001492,00001492,0x000001,00000.0,0xfb0001,0x00fe01,0xfdfefd,0x00fe01,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000
00001493,00001493,00001493,0x000001,00000.0,0xfa01f9,0x00fe00,0xfdfefd,0x00fe01,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000
00001494,00001494,00001494,0x000001,00000.0,0xfefe00,0x00fe00,0xfdfefd,0x00fe01,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000
00001495,00001495,125830630,0x000104,99999.9,0x979300,0xfc0001,0xfcfefc,0x00fe01,0x000000,0x564c4a,0x357225,0x975350,0xc1b2ab
00001496,00001496,126600674,0x000104,99999.9,0x00fe01,0xfc0001,0xfdfefc,0x37c026,0xbf9626,0xf4d5d0,0x50ab37,0xa34930,0xf5ccc4
00001497,00001497,00017894,0x000404,99999.9,0xfafc03,0xfc0001,0xfcfefc,0x37c028,0xbf9626,0x513c3b,0x1a3914,0x361810,0x1b1211
00001498,00001498,00017895,0x000001,00000.0,0xfafdfd,0xfb0001,0xfcfdfc,0x00fe00,0xbf9626,0x513c3c,0x000000,0x361810,0x1b1212
00001499,00001499,00001512,0x000404,16384.0,0x000000,0xfc00fc,0xfefefc,0x00fe00,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000
00001500,00001500,00001513,0x000001,00000.0,0x0100fa,0xfc00fc,0xfefefc,0x00fe01,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000
00001501,00001501,00001514,0x000001,00000.0,0x02fd00,0xfd00fc,0xfefdfd,0x00fe00,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000
00001502,00001502,00001515,0x000001,00000.0,0x00fe0d,0xfdf0fc,0xfefdfd,0x00fe00,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000
00001503,00001503,00001516,0x000001,00000.0,0xfa0001,0xfdf0fd,0xfdfdfc,0x01fe01,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000
00001504,00001504,00001517,0x000001,00000.0,0xfc00fa,0xfd00fc,0xfdfdfc,0x00fe01,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000
00001505,00001505,00001517,0x000204,00001.0,0xfc00fa,0xfd00fc,0xfdfdfc,0x00fe01,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000
00001506,00001506,00001516,0x000404,00002.0,0xf90104,0xfdf0fc,0xfdfdfc,0x00fe01,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000
00001507,00001507,00001517,0x000001,00000.0,0xfa02f7,0xfdf0fc,0xfdfdfc,0x00fe01,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000
00001508,00001508,00001516,0x000404,00002.0,0xff4d03,0xfdf0fc,0xfdfdfc,0x00fe01,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000
00001509,00001509,00001517,0x000001,00000.0,0xff4df8,0xfdf0fc,0xfdfdfc,0x00fe01,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000
00001510,00001510,00001512,0x000404,00006.0,0x000000,0xfdf15f,0xfcfdfb,0x00fe01,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000
00001511,00001511,00001513,0x000001,00000.0,0x0000fb,0xfdf15f,0xfcfdfb,0x00fe01,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000
00001512,00001512,00001162,0x000404,00352.0,0x01fd02,0x0001fb,0x55fd55,0x00fe01,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000
00001513,00001513,00001162,0x000204,00001.0,0x03fc05,0x0001fb,0x55fd55,0x01fe7f,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000
00001514,00001514,00005772,0x000104,04609.0,0xfb0000,0x0001fb,0x01fd01,0x01fd01,0x01fd01,0x0000fc,0x000000,0x000000,0x000001,0x000000
00001515,00001515,00005773,0x000001,00000.0,0xfa01fa,0x0001fb,0x01fd01,0x01fd01,0x01fd01,0x0000fd,0x000000,0x000000,0x000001,0x000000
00001516,00001516,00005774,0x000001,00000.0,0xfbfd01,0x0001fc,0x01fd01,0x01fd01,0x01fd01,0x0000fd,0x000000,0x000000,0x000001,0x000000
00001517,00001517,00005775,0x000001,00000.0,0xfcfdfc,0x0001fc,0x01fd01,0x01fd01,0x01fd01,0x0000fd,0x000000,0x000000,0x000001,0x000000
00001518,00001518,00005776,0x000001,00000.0,0x000000,0x00fe00,0x01fe00,0x01fd01,0x0000fd,0x000000,0x000000,0x000000,0x000001,0x000000
00001519,00001519,00005777,0x000001,00000.0,0x0200f8,0x00fe00,0x00fe00,0x01fd01,0x0000fd,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000,0x000000
```