

S-38.128 Teletekniikan erikoistyö (2 ov)

MPLS-standardit

Tekijä: Pyry Kuusi, Ti N, 40368P
Ohjaaja: Mika Ilvesmäki
Aihe haettu: 18.9.1997
Jättöpäivä: 9.2.1998

Tiivistelmä

MPLS eli MultiProtocol Label Switching on uusi IETF:n määrittelyvaiheessa oleva protokolla. MPLS sijoittuu perinteisen siirtoyhteyskerroksen ja verkkokerroksen välimaastoon. Perusideana on vähentää verkkokerrosreitityksen tarvetta liittämällä paketteihin lyhyitä etikettejä, joiden pohjalta edelleenreitityspäätös voidaan tehdä yksinkertaisesti ja nopeasti. Etiketit voidaan koodata joko siirtoyhteyskerroksen paketin sisään tai suoraan sen otsikkotietoihin (esim. ATM:ssä).

Standardin määrittelyn kohteena on etikettikytkennän toimintatapa, etikettien jakelumekanismit, etikettien koodaustavat ja käyttö erilaisten siirtoyhteyskerroksen protokollien kanssa. Tietovirtojen yhdistäminen yhden etiketin alle on merkittävä tapa lisätä protokollan skaalautuvuutta. Lisäksi on ratkaistava joukko teknisiä yksityiskohtia, kuten silmukoiden esto, hierarkinen toiminta ja eksplisiittinen reititys.

Sisällysluettelo

1. LYHENTEET JA KÄSITTEET	4
2. JOHDANTO	5
2.1 MPLS:N EDUT	6
3. MPLS:N PERUSRAKENNE	6
4. MPLS-TEKNIikka	7
4.1 ETIKETTITIE TOJEN TALLENNUS	7
4.2 ETIKETT IEN JAKELU	8
4.2.1 Eksplisiittinen etikettien jakelu	8
4.2.2 Piggybacking	8
4.2.3 Hyväksyttävät etikettien arvot.....	8
4.2.4 Etikettien jakelun luotettavuus.....	8
4.2.5 Etikettien poistomekanismi	9
4.3 LDP	9
4.3.1 Toiminta.....	9
4.3.2 Viestit.....	9
4.4 ETIKETT IEN KOODAU S	10
4.4.1 Erityislaitteistot tai -ohjelmistot	10
4.4.2 ATM-kytkimet.....	10
4.4.3 Koodaustapa.....	10
4.5 TIETOVIRTOJEN YHDISTÄMINEN	11
4.5.1 Yhdistelyyn kykenemättömät reitittimet	11
4.5.2 Yhdistely ATM-tekniikalla	11
4.5.3 Optimointikysymyksiä	12
4.6 SILMUKOIDEN KÄSITTELY	13
4.6.1 Eri strategiat.....	13
4.6.2 Silmukoiden esto MPLS:ssä.....	13
4.7 HIERARKINEN TOIMINTA.....	14
4.8 TOIMINTA ATM:N KANSSA.....	15
4.9 TOIMINTA FRAME RELAY -TEKNIIKAN KANSSA.....	15
4.10 MPLS LÄHIVERKOSSA.....	16
4.11 MPLS JA RSVP	16
4.12 EKSPLISIITTINEN REITITYS	16
4.13 MUITA TEKNISIÄ KYSYMYKSIÄ	17
4.13.1 Multipath	17
4.13.2 Multicast.....	17
4.13.3 Etikettikytkettyjen polkujen luonnin kontrolli	17
4.13.4 Turvallisuus	18
4.13.5 TTL	18
4.13.6 PPP.....	18
4.13.7 Virtuaaliset yksityiset verkot.....	18
5. YHTEENVETO	19
6. LÄHTEET	20

1. Lyhenteet ja käsitteet

- alavirta (downstream), ylävirta (upstream); tietovirran suunnassa toista jäljempänä oleva solmu on tähän nähden “alavirrassa”, vastaavasti edellinen on “ylävirrassa”
- **ATM** (Asynchronous Transfer Mode); siirtoyhteyserroksen tiedonsiirtoprotokolla
- edelleenreititys (forwarding); solmuun sisään tulevan paketin lähettäminen seuraavalle solmulle
- etiketti (label); lyhyt tunniste jollekin tietovirralla
- **FEC** (Forwarding Equivalence Class); ekvivalenssiluokka edelleenreitityksen suhteen: kaikki samaan luokkaan luokitellut paketit reititetään samalla tavalla
- **IETF** (Internet Engineering Task Force); Internetin standardointia hoitava elin
- **ILM** (Incoming Label Map); taulukko joka indeksoi sisään tulevat etiketit NHLFE-tietorakenteille
- **LDP** (Label Distribution Protocol); etikettien jakeluprotokolla
- **LSP** (Label Switched Path); etikettikytketty polku
- **LSR** (Label Switching Router); etikettikytkentäinen reititin eli reititin joka kykenee reitittämään paketteja etikettien avulla
- **MPLS** (MultiProtocol Label Switching); MPLS-työryhmän määrittelemä etikettien käyttöön pohjautuva protokolla
- MPLS-alue (MPLS-domain); joukko toisiinsa kytkettyjä solmuja, jotka kaikki tukevat (käyttävät) MPLS-protokollaa
- **NHLFE** (Next Hop Label Forwarding Entry); etikettikytkennässä käytetty tietorakenne
- **QoS** (Quality of Service); (tiedonsiirto)palvelun laatutaso
- sisääntulosolmu (ingress node); solmu, johon voi tulla liikennettä MPLS-alueen ulkopuolelta
- solmu (node); verkkoelementti, reititin
- **STN** (Stream-to-NHLFE Map); taulukko joka indeksoi sisään tulevat etiketittömät paketit NHLFE-tietorakenteille
- **SVC** (Switched Virtual Circuit); ATM:n kytketty virtuaalipiiri
- **SVP** (Switched Virtual Path); ATM:n kytketty virtuaalipolku
- tietovirta (data flow, data stream); kahden sovelluksen tms. välinen tietovirta (yhteen suuntaan), voi olla myös useista tietovirroista muodostettu aggregaatti
- **TTL** (Time-to-live); paketin jäljellä oleva elinaika

- uloslähtösolmu (egress node); solmu, josta voi kulkea liikennettä MPLS-alueen ulkopuolelle
- VC (Virtual Circuit); ATM:n virtuaalipiiri
- VCI/VPI (Virtual Circuit Identifier / Virtual Path Identifier); ATM:n virtuaalipiirin tunniste
- VP (Virtual Path); ATM:n virtuaalipolku
- VPN (Virtual Private Network); virtuaalinen yksityinen verkko

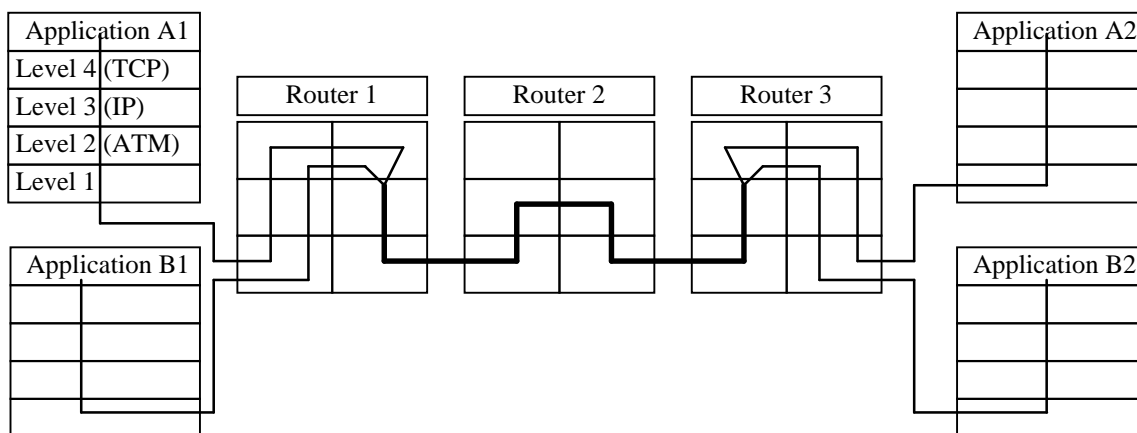
2. Johdanto

Internetin kehittämisorganisaation IETF:n uudeksi työryhmäksi on koottu ryhmä valmistelemaan MPLS-standardia (MultiProtocol Label Switching). Tavoitteena on standardoida perusteknologia, joka integroi etikettien (label) vaihtoon perustuvat reititysmallit verkkokerroksien reititykseen. Tällä teknologialla toivotaan saavutettavan kustannusetuja verkkokerrosreititykseen, parempaa verkkokerroksen skaalautuvuutta ja joustavuutta reitityspalvelujen tarjontaan.

Tämän raportin kirjoittamisen aikaan tammikuussa 1998 MPLS-standardit ovat edelleen luonnosvaiheessa (Internet drafts).

MPLS toimii nimensä mukaisesti kaikkien siirtoyhteyserroksen protokollien kanssa. MPLS on aluksi suunnattu lähinnä IPv4:ää ja IPv6:tta varten, mutta perusteknologiaa voidaan laajentaa toimimaan useiden erilaisten verkkokerrosprotokollien kanssa. [1]

Verkkokerroskytkennän (esim. IP-kytkennän) ideana on vähentää verkkokerrosreitityksen tarvetta korvaamalla se siirtoyhteyserroksen kytkennällä. Kuva 1 esittää tilannetta, jossa kaksi sovellusta lähettää IP-verkon yli dataa. Ensimmäinen reititin luokittelee kummatkin tietovirrat saman etiketin alle, jolloin ne yhdistyvät yhdeksi kytketyksi tietovirraksi, joka avautuu jälleen MPLS-alueen päässä viimeisessä reitittimessä. Kuvan kerrokset vastaavat OSI-mallin kerroksia.



Kuva 1

2.1 MPLS:n edut

MPLS etuja on tässä analysoitu tilanteessa, jossa MPLS:ää käytetään runkoverkossa.

MPLS:n tuomia etuja datagrammireititykseen verrattuna ovat *A Framework for Multiprotocol Label Switching* -dokumentin [1] mukaan:

- Yksinkertaisempi edelleenreititys (mahdollisesti nopeusetuja); ei tarvita parhaan vastaavuuden etsintää, vaan suoraviivainen "look-up" riittää
- Tehokas eksplisiittinen reititys; tietoa koko reitistä ei tarvitse liittää jokaiseen pakettiin
- Parempi pohja liikenteen tasapainotukselle; tietovirrat sisääntulosolmuilta uloslähtösolmuille helposti tunnistettavissa ja liikenne mitattavissa, myös eksplisiittinen reititys käytettävissä
- QoS-reititys; eksplisiittinen reitityksen avulla
- Monimutkaiset kuvaukset IP-pakettien ja FEC:ien välillä; koska kuvaus tarvitsee tehdä vain MPLS-alueen sisääntulosolmussa, vältetään ylisuuri prosessointi muissa reitittimissä
- Mahdollisuus toiminnallisuuden jaotteluun verkkoelementtien välillä; raskaat operaatiot voidaan suorittaa sisääntulosolmuissa ja jatko-operaatiot FEC:ien pohjalta
- Sama edelleenreititysmalli useille eri palveluille yhtä aikaa; esim. IP-tunnelointi, VPN:t, jne.

MPLS:n tuomia etuja puhtaaseen ATM- tai Frame Relay -ytimeen verrattuna ovat:

- Reititysprotokollien skaalautuvuus paranee; niiden naapurien, joiden kanssa tarvitsee olla yhteydessä, määrä pienenee
- Yhdenmukainen toiminta paketti- ja solutekniikoiden päällä; esim. etikettien jakelu pitkälle samanlaista kaikkien tekniikoiden kanssa
- Helpompi verkonhallinta; etuja saavutettavissa yhdenmukaistumisen myötä
- "Cut-through SVC":ien ongelmat vältetään; näitä ei enää tarvita

3. MPLS:n perusrakenne

MPLS:n perusideana on vähentää verkkokerrosreitityksen tarvetta korvaamalla se siirtoyhteystason kytkennällä. Reititystiedon ylläpito hoidetaan MPLS:ää käytettäessä standardeilla verkkokerrosprotokollilla (esim. OSPF:llä tai BGP:llä [21] [22]). Verkkokerrosprotokollien ylläpitämää tietoa käytetään liittämään luotuihin (kytkettyihin) reitteihin lyhyitä etikettejä, joita käytetään sitten pakettien edelleenlähetyksessä. Näin jokaisen reitittimen ei tarvitse tutkia jokaisen paketin verkkokerrostason otsikkoa ja etsiä reititystaulukostaan parasta vastaavuutta, vaan ne

voivat useimmiten tehdä edelleenlähetyksen suoraan siirtoyhteyskerroksen otsikkotietojen (tms. etiketin) perusteella.

Yksinkertaisimmillaan etikettiä voidaan ajatella paketin otsikkotietojen lyhennyksenä, jota voidaan käyttää paketin edelleenreitityksen indeksointiin. Etikettien arvoilla on siten merkitystä ainoastaan paikallisesti. Etiketti on vain lyhyt merkintätapa joukolle käyttäjien tietovirtoja, jotka kuuluvat samaan edelleenreitityksen ekvivalenssiluokkaan (FEC). Samaa ekvivalenssiluokkaan kuuluvat paketit reititetään solmusta samalla tavalla eteenpäin. Pakettien jako eri ekvivalenssiluokkiin voi tapahtua useilla eri kriteereillä (esim. IP-osoitteiden sopivien osien perusteella). [1] [2]

Perusoperaatioksi pakettien edelleenreitityksessä muodostuu etiketin vaihto (label swap): sisään tulevan etiketin perusteella määritetään ulos lähtevä etiketti, portti ja muu mahdollisesti tarvittava tieto. Joskus voi olla hyödyllistä kuljettaa pakettien mukana yhden etiketin sijasta etikettipinoa. Paketin tullessa MPLS-alueeseen siihen liitetään (ensimmäinen) etiketti ja sen poistuessa alueelta siitä poistetaan (viimeinen) etiketti.

MPLS:ään kuuluu oleellisena osana etikettien kytkeminen verkkokerroksen reitteihin. Tähän tarvitaan menetelmät etikettien luomiseen ja välittämiseen reitittimien välillä. Etikettitiedot koodataan joko erilliseksi MPLS-otsikoksi tai suoraan siirtoyhteyskerroksen (esim. ATM:n) otsikkotietoihin. Etikettipinon lisäksi voidaan tarvita muutakin tietoa, esim. TTL (time-to-live). [1]

Edelleenreititystä verkkokerroksen tasolla tarvitaan edelleen ainakin [1]:

- skaalautuvuuden takia (kun etiketit eivät tarjoa tarpeeksi hienojakoista jaottelua)
- turvallisuuden takia (palomuurit)
- ensimmäisessä solmussa (host computer)

4. MPLS-tekniikka

4.1 Etikettitietojen tallennus

Etiketillisen paketin edelleenreitityksessä käytetään tietorakennetta nimeltä "Next Hop Label Forwarding Entry" eli NHLFE, johon on tallennettu seuraavat tiedot [2]:

- paketin seuraava määränpää
- siirtoyhteydelle lähetyksessä käytettävä kapselointi
- etikettipinon lähetyksessä käytettävä koodaustapa
- operaatio, joka suoritetaan etikettipinolle:
 - etiketin vaihto (swap) eli päällimmäisen etiketin korvaus toisella (käsillä olevaan NHLFE:hen talletetulla) etiketillä TAI
 - etikettipinon päällimmäisen etiketin poisto (pop) TAI
 - etiketin vaihto + yhden tai useamman etiketin lisäys (push)

Taulukkoa joka kuvaa sisään tulevan etiketin NHFLE:lle kutsutaan ILM:ksi (Incoming Label Map). Taulukkoa joka kuvaa etiketittömät sisään tulevat paketit NHFLE:lle kutsutaan STN:ksi (Stream-to-NHLFE Map).

4.2 Etikettien jakelu

Koska etikettikytkentäisten reitittimien (LSR eli Label Switching Router) täytyy ymmärtää toistensa käyttämiä etikettejä, täytyy olla määriteltyinä menetelmät joilla etikettejä luodaan ja jaellaan. MPLS-työryhmä on tutkinut useita eri vaihtoehtoja tämän asian ratkaisemiseksi. Ylipäätään etikettien *luominen* voi tapahtua kolmella pääkriteerillä [1]:

1. Topologian mukaan (topology-driven, esim. OSPF, BGP)
2. Kyselyjen mukaan (request-driven, esim. RSVP)
3. Liikenteen mukaan (traffic-driven, esim. CSR, Ipsilon)

4.2.1 Eksplisiittinen etikettien jakelu

Eksplisiittisessä etikettien jakelussa käytetään MPLS:n määrittelemää standardiprotokollaa (LDP eli Label Distribution Protocol). Tässä menettelyssä etiketit voidaan luoda (ainakin) kolmella tavalla. "Downstream label allocation"-tavassa etikettejä indekseinä käyttävä LSR kommunikoi ylävirrassa oleville naapureilleen edelleenreitityksessä käyttämiensä etikettien arvot (ja sidonnat). "Upstream label allocation"-tavassa LSR kommunikoi alavirran naapureilleen ulos lähettämiensä etikettien arvot (voisi helpottaa esim. multicast:in toteutusta). Kolmas tapa on tehdä etiketeistä uniikkeja MPLS-alueen sisällä tai globaalisti. [1]

Valittava tapa MPLS-standardiin on mitä todennäköisimmin "Downstream label allocation".

4.2.2 Piggybacking

Eksplisiittisen etikettien jakelun sijaan etiketit voidaan myös liittää mukaan muihin kontrolliviesteihin. Useita eri reititysprotokollia (esim. OSPF, BGP, RSVP) voitaisiin muokata kuljettamaan mukanaan etiketti-informaatiota. Näin myös välttäisi reittien määrittämisen ja etikettien jakelun eriytymiseltä. Tämä ei estä LDP:n käyttöä, vaan toimii sen vaihtoehtona. [1]

4.2.3 Hyväksyttävät etikettien arvot

Koska kaikki verkkoelementit (esim. ATM-kytkimet) eivät välttämättä tue kaikkia (standardin hyväksymiä) etikettien arvoja, tarvitaan LSR:ien välillä menetelmät käytettävien etikettien arvoalueiden määrittämiseen (ks. tarkemmin 4.3 LDP). [1]

4.2.4 Etikettien jakelun luotettavuus

Jos etikettien jakelu on kytketty reititysprotokollan toimintaan, niin voidaan olettaa protokollan olevan kykenevä riittävään luotettavuuteen etikettien jakelussa. Jos siirtoyhteyskerroksen ja verkkokerroksen välillä on suuri suorituskykyero, niin etiketin

välittymättä jäämisestä on paljon haittaa. Näin ollen LDP:hen tarvitaan mekanismi etikettien välittymisen varmistamiseen (esim. TCP-tyyppisen yhteyden avulla). [1]

4.2.5 Etikettien poistomekanismi

Etikettien poisto voi tapahtua joko ajastetusti (time-out) tai eksplisiittisillä etikettien poistoviesteillä. [1]

4.3 LDP

Etikettien jakeluprotokollaksi MPLS:ään on suunniteltu uusi LDP:ksi kutsuttu protokolla. Tämä protokolla on kuvattu yleisiltä osiltaan dokumentissa *Generic Label Distribution Protocol Specification* [5] ja tarkemmin dokumentissa *LDP Specification* [6].

4.3.1 Toiminta

Jotta reititin voisi toimia LSR:nä, tulee sen kyetä selvittämään onko jokin sen naapuri kykenevä etikettireititykseen. LSR:t lähettävät toisilleen ilmoitusviestejä sopivin väliajoin. Jos vastaanottajareititin vastaa viestiin, voidaan aloittaa LDP:n varsinainen käyttö. Jos naapuri ei vastaa ilmoitusviesteihin tietyn aikarajan sisällä, katsotaan yhteys puretuksi.

LSR voi pyytää alavirrasta etikettejä, luoda etikettejä ylävirran naapureilleen ja poistaa etikettien sidontoja ylä- tai alavirran naapureiltaan. Pyyntöihin tulevien vastauksien ei tarvitse olla välittömiä (LSR voi esim. delegoida pyynnön alavirtaan), vaan reititystä jatketaan verkkokerrostaalla siihen asti kunnes sopiva etiketti saadaan.

Jos esim. reitityksen muutoksen takia jonkin FEC:n etiketti vanhentuu, pitää LSR:n poistaa etiketin sidonta lähettämällä purkuviesti. Purku pitää suorittaa luotettavasti, joten sen ei katsota tulevan voimaan ennen kuin viestin vastaanottajalta saadaan kuittaus.

4.3.2 Viestit

Kaikkien viestien otsikkotietue on samanlainen ja osoittaa viestin tyyppin, pituuden ja sen sisältämien verkkokerrososoitteiden tyyppin. Tämän lisäksi viestiin voi kuulua lisätietoa omina elementteinään. Protokollan toteutukseen tarvitaan kuusi erilaista viestiä:

1. **Ilmoitusviesti naapurille.** Viesti sisältää kaikkien niiden (MPLS-)solmujen osoitteet, joista lähettävä LSR on tietoinen.
2. **Sidontapyyntö.** Viestissä kulkee se osoiteprefiksi, jolle etiketti halutaan varattavan. Tämän lisäksi viesti sisältää bittimaskin, jolla osoitetaan mitä bittejä alavirran naapuri voi käyttää antamassaan etiketissä.
3. **Etiketin sidonta.** Viesti sisältää uuden etiketin arvon (32 bittiä) ja virhekoodin jos sidontapyyntöä ei voitu täyttää. Viestissä ilmoitetaan myös etikettiin liitetyn FEC:n tiedot. Lisäksi viestissä kerrotaan (verkkokerroksen) hyppyjen määrä, jota

vastaanottajan tulisi käyttää TTL-laskurin päivytyksessä (ks. tarkemmin 4.13.5 TTL).

4. **Sidonnan poisto.** Viesti sisältää poistettavan etiketin arvon.
5. **Sidonnan poiston kuittaus.** Viesti ei sisällä mitään erityisinformaatiota.
6. **Etiketin sidonnan hylkäys.** Viesti sisältää sen etiketin arvon, jota hylkäysviesti koskee, sekä virhekoodin joka kertoo sidonta- tai poistoviestin hylkäämisen syyn.

4.4 Etikettien koodaus

Jotta etikettipinoja voitaisiin välittää MPLS-solmujen välillä, tarvitaan jokin konkreettinen koodaustapa. Arkkitehtuuri antaa mahdollisuuden useiden erilaisten koodaustapojen käyttöön. Valittu tapa riippuu lähinnä kulloinkin kyseessä olevasta laitteesta.

4.4.1 Erityislaitteistot tai -ohjelmistot

Käytettäessä erityistä MPLS-laitteistoa tai -ohjelmistoa yksinkertaisin tapa koodata etikettipino on määritellä geneerinen (verkko- ja siirtoyhteyskerroksesta riippumaton) MPLS-kapselointi. Tämän sisällöksi viedään välitettävä verkkokerroksen paketti ja MPLS-otsikkoon koodataan etikettipino sekä TTL- ja CoS-kentät. TTL-kenttää käytetään samanlaiseen toimintaan kuin IP:ssä. CoS-kenttä antaa reitittimille mahdollisuuden käsitellä eri paketteja eri tavoin ilman että niille tarvitsee varata uusia etikettejä. [1] [2]

4.4.2 ATM-kytkimet

Koska ATM-kytkimien toiminta vastaa hyvin läheisesti MPLS:n mukaista etikettipohjaista edelleenreititystä (etikettiä vastaa VCI/VPI-pari), on haluttavaa tehdä näistä laitteista etikettikytkentäisiä reitittimiä sopivin laitteisto- ja/tai ohjelmistopäivityksin. Tällaisia laitteita kutsutaan ATM-LSR:ksi. Etikettien koodaukseen on kolme perustapaa [2]:

- SVC-koodaus (Switched Virtual Circuit): VPI/VCI:tä käytetään koodaamaan etikettipinon päällimmäinen etiketti (etikettipinon koko ei voi muuttua). Tällöin LSP (Label Switched Path) toteutuu ATM-SVC:nä ja LDP:stä tulee ATM:n “signalointiprotokolla”.
- SVP-koodaus (Switched Virtual Path): VPI:tä käytetään koodaamaan etikettipinon päällimmäinen etiketti ja VCI:tä sen alla oleva etiketti (jos olemassa).
- SVP-Multipoint -koodaus: kuten SVP-koodaus mutta VCI:stä käytetään vain osa toisen etiketin koodaukseen ja loppuosa osoittamaan LSP-sisääntulosolmu.

4.4.3 Koodaustapa

Koodauksen yksityiskohtia on selostettu dokumentissa *MPLS Label Stack Encoding* ([4]). Etiketin pituus on 32 bittiä, ja se jakaantuu seuraavasti:

- “Bottom of stack”-bitti osoittaa onko etiketti pinon alimmainen

- 8 bitin TTL-kenttä (Time-To-Live)
- 3 bitin CoS-kenttä (Class of Service)
- varsinainen etiketin arvo (20 bittiä); arvot 0-16 on varattu erikoistarkoituksiin

Etikettien käyttö voi aiheuttaa sen, että paketti kasvaa suuremmaksi kuin suurin sallittu pakettikoko. Tämä ongelman on kuitenkin esitetty ratkaisuihin. [4]

4.5 Tietovirtojen yhdistäminen

MPLS:n skaalautuvuutta parannetaan tietovirtojen yhdistämisellä (stream merge, stream aggregation). Yhdistäminen mahdollistaa usean tietovirran kuvaamisen yhdelle alavirran LSP:lle. Tästä seuraa että uloslähtösolmuun tuleva virta voi muodostaa puun (multipoint-to-point), jossa uloslähtösolmu on juurena. Tämä voi vähentää tarvittavien etikettien määrää hyvinkin radikaalisti.

Esitetty arkkitehtuuri ei vaadi, että kaikki solmut kykenevät tietovirtojen yhdistelyyn. Tästä syystä tarvitaan varmistukset eri kykyisten reitittimien yhteensopivuudesta. Yhdistelyyn kykenevä LSR kykenee kuvaamaan useita sisään tulevia etikettejä yhdelle ulos lähtevälle etiketille. Näin ollen tällaisen LSR:n tarvitsee ylläpitää vain yhtä etikettiä FEC:iä kohden. Yhdistelykyvytön LSR voi joutua ylläpitämään yhdelle FEC:lle yhtä etikettiä jokaista verkon LSR:ää kohden. [2]

Kehystekniikoiden (frame-based) kanssa yhdistäminen on melko suoraviivaista toisin kuin ATM:ssä, jossa datapaketit on jaettu useisiin soluihin. Eri datapaketteja ei voi suoraan yhdistää samalle VCI:lle, koska pakettien solut voisivat siirtyä toisiinsa nähden limittäin ja sotkea pakettien sisällöt. MPLS-standardin ehdotus tarjoaa tähän ongelmaan kaksi ratkaisua. Toinen sallii tietovirtojen yhdistelyyn kykenemättömien reitittimien käytön ja toinen mahdollistaa ATM-kytkimien toimimisen yhdistelvinä LSR:inä. [1] [2]

4.5.1 Yhdistelyyn kykenemättömät reitittimet

Ylävirran LSR, joka ei kykene yhdistelemään tietovirtoja, voi tarvita useita etikettejä FEC:iä kohden. Koska tarvittavien etikettien määrää ei tiedetä etukäteen, ei ko. reitittimelle lähetetä alavirrasta etikettejä ennen kuin reititin niitä erikseen pyytää. Jos pyynnön vastaanottanut LSR ei itsekään tue tietovirtojen yhdistelyä, delegoi se pyynnön alavirtaan.

Jos jokin reititin tukee tietovirtojen yhdistelyä rajallisesti ja ei esim. jonkin laiterajoituksen takia pysty yhdistelemään kuin rajatun määrän tietovirtoja, voi se soveltaa edellä kuvattua menettelyä. Reititin pyytää tällöin alavirrasta yhden etiketin per maksimilukumäärä tietovirtoja jotka se pystyy yhdistelemään. [2]

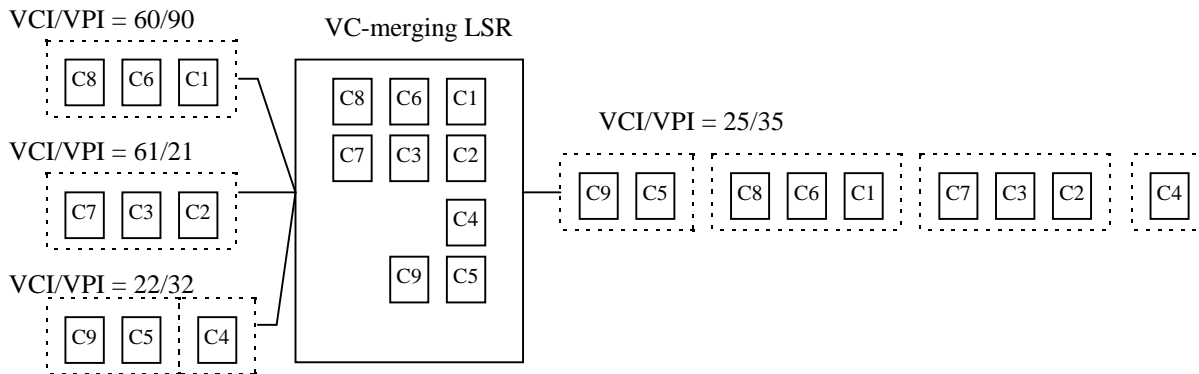
4.5.2 Yhdistely ATM-tekniikalla

Limittyvyysongelma voidaan ATM:ää käyttäen välttää kahdella tavalla: VC-yhdistelyllä (VC merge) ja VP-yhdistelyllä. VC-yhdistelyssä useat sisään tulevat VC:t yhdistetään yhdeksi ulos lähteväksi VC:ksi. VP-yhdistelyssä useita sisään tulevia

VP:itä yhdistetään yhdeksi lähteväksi VP:ksi ja eri VCI:t VP:n sisällä erottavat tietovirrat toisistaan. [1] [2]

VC-yhdistelyn huonona puolena on se, että yhdistely vaatii pakettien solujen puskurointia. VP-yhdistely on VC-yhdistelyä helpompi toteuttaa olemassa olevilla laitteilla, mutta sitä käytettäessä tarvitaan tapa VCI:den koordinointiin VP:n sisällä. Toisaalta ATM:ää ei tarvitse pakottaa puskuroimaan pakettien soluja. VC-yhdistelystä aiheutuvan lisäpuskuroinnin tarve on havaittu kuitenkin melko minimaaliseksi. [20]

VC-yhdistelyssä solmun on siis pidettävä eri AAL5-kehysten (jotka vastaavat siis IP-paketteja) solut erillään toisistaan. Tämä voidaan tehdä suorittamalla "SAR-toiminto" IP-paketin jälleenmuodostamiseksi ennen edelleenlähetystä. Tässä tapauksessa VC-yhdistely on oleellisesti sama asia kuin kehisyhdistely. Vaihtoehtoinen tapa on yksinkertaisesti puskuroida AAL5-kehysten solut ja lähettää ne eteenpäin kun kehysten loppumerkki on vastaanotettu. Kuva 2 havainnollistaa VC-yhdistelyn periaatetta. Reititin ylläpitää puskureita jokaiselle saapuvalla vajoalle kehykselle.



Kuva 2

ATM-solmujen erilaiset tietovirtojen yhdistämiskyvyt aiheuttavat yhteensopivuuskysymyksen. VC-yhdistelyyn kykenevä solmu voi pyytää naapureiltaan yksinkertaisesti yhden etiketin jokaista FEC:iä kohden. Yhdistelykyvytön solmu pyytää alavirran naapuriltaan yhden VC:n itselleen ja yhden jokaista sisään tulevaa VC:tä kohden (delegointia). VP-yhdistelyn tapauksessa edellä kuvattussa menettelyssä käytetään VC:n sijassa VP:tä. [1] [2]

4.5.3 Optimointikysymyksiä

Tarvittavien etikettien määrä riippuu solmujen yhdistelykyvyistä. Taulukko 1 kuvaa eri kombinaatioiden vaikutusta etikettien määrään. Alavirran yhdistelyllä tarkoitetaan tietovirtojen yhdistelyä, josta päätöksen on tehnyt alavirran solmu. Paikallisella yhdistelyllä tarkoitetaan tietovirtojen yhdistelyä, josta päätöksen on tehnyt solmu itse. [17]

	Ei alavirran yhdistelyä	Alavirran yhdistely
Ei paikallista yhdistelyä	$O(N^2 \cdot D)$; missä N = uloslähtösolmujen määrä, D = kohdeosoitteiden määrä uloslähtösolmua kohden	$O(N^2)$; missä N = uloslähtösolmujen määrä
Paikallinen yhdistely	$O(N \cdot D)$; missä N = uloslähtösolmujen määrä, D = kohdeosoitteiden määrä uloslähtösolmua kohden	$O(N)$; missä N = uloslähtösolmujen määrä

Taulukko 1 - Etikettkytkettyjen polkujen määrä

Skaalautuvuuskysymyksiä on analysoitu myös dokumentissa *Scalability Issues in Label Switching over ATM* [19].

4.6 Silmukoiden käsittely

4.6.1 Eri strategiat

Silmukoiden käsittely voidaan jakaa kolmeen ryhmään [1]:

1. **Silmukoista aiheutuvien haittojen minimointi** (loop survival). Haittoja voidaan minimoida poistamalla paketteja TTL-kentän avulla, käyttämällä jotain sopivaa dynaamista reititysprotokollaa tai oikeudenmukaista jonotusta verkkosolmuissa. Näistä TTL:n käyttö on ilmeisesti käyttökelpoisin vaihtoehto, mutta sitä ei voi helposti suoraan soveltaa esim ATM:ään.
2. **Silmukoiden havainti** (loop detection). Silmukat voidaan havaita lähettämällä LDCP-paketti (Loop Detection Control Packet) määränpäähän. Jos paketti palaa lähettäjäsolmuun, niin vastaava etiketti poistetaan käytöstä ja siirrytään (tältä osin) verkkokerrosreititykseen. Toinen tapa perustuu määränpäähän pääsemiseksi tarvittavien hyppyjen (hop) lukumäärien laskentaan.
3. **Silmukoiden syntymisen esto** (loop prevention). Tämä metodi vaatii että uloslähtösolmu indusoi etikettien jakelun kontrollipaketeilla. Jos kontrollipaketti jää silmukkaan, ei polkua voida muodostaa (kokonaisuudessaan). Myös eksplisiittinen reititys on mahdollista mutta ei tarpeeksi yleiskäypä ratkaisu.

4.6.2 Silmukoiden esto MPLS:ssä

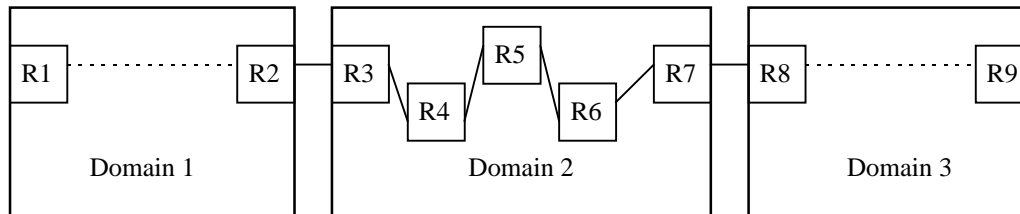
Ehdotetussa MPLS-arkkitehtuurissa [2] kuvataan tapa silmukoiden syntymisen estoon. Kukin LSR ylläpitää jokaiselle käyttämälleen etikettkytketylle polulle (LSP eli Label Switched Path) listaa siihen kuuluvien LSR:ien tunnisteista (id). Lista välitetään myös naapureille ylävirtaan. Listaa käytetään estämään kytkettyjen silmukoiden muodostumista seuraavasti:

- Kun solmu S havaitsee muutoksen jonkun tietovirran edelleenreitityksessä, se pyytää uudelta seuraavan hypyn solmulta etikettiä ja listaa LSR:stä.
- Jos S havaitsee olevansa mukana vastauksena saadussa listassa, ei uutta LSP:tä voida käyttää, vaan joudutaan odottamaan kunnes reititysprotokollat purkavat silmukan.
- Jos S ei ole listassa mukana, aloittaa se “diffuusiolaskennan”, jonka tarkoituksena on varmistaa että ylävirrassa ei ole solmuja jotka ovat listassa ja jotka reitittävät tarkasteltavan tietovirran S:n kautta. S lisää itsensä listaan ja lähettää sen kyselynä kaikille ylävirran naapureilleen. Naapuri N vastaa OK-viestillä, jos se ei reititä tarkasteltavaa tietovirtaa S:lle. Muussa tapauksessa N tarkistaa onko se saamallaan listalla. Jos on, niin se vastaa LOOP-viestillä eikä uutta LSP:tä voi käyttää. Jos N ei ole listalla jatkaa se diffuusiolaskentaa ylävirtaan.

Solmut, jotka eivät tue silmukoiden syntymisen estoa, vastaavat diffuusiolaskentakyselyihin aina OK-viestillä (jolloin silmukkoja siis voi muodostua).

4.7 Hierarkinen toiminta

MPLS sallii hierarkisen toiminnan etikettipinon avulla. Näin reititystä voidaan tehdä yhtä aikaa useilla eri tasoilla. Tätä kutsutaan monesti tunneloinniksi. [1] [2]



Kuva 3

Kuva 3 kuvaa esimerkkiä tilanteesta, jossa MPLS voi toimia hierarkisesti. Kolme aluetta (domainia) voivat olla esim. eri Internetin palveluntarjoajien verkkoja. Tässä tilanteessa voidaan käyttää reititykseen esim. BGP:tä reitittimien R1, R2, R3, R7, R8 ja R9 välillä ja OSPF:ää reitittimien R4, R5 ja R6 välillä. Domain 2:n alueella etikettipinossa kulkee siis kaksi etikettiä (päällimmäisenä domainin sisäisen reitityksen etiketti).

MPLS:n hierarkinen toiminta edellyttää:

- Hierarkista etikettien vaihtoa LDP:ssä
- Etikettipinoa
- Konfigurointia: Reitittimien tulee tietää milloin käyttää hierarkista etikettiä

Joissain tapauksissa etikettien pinoamista voidaan käyttää hyväksi riippumatta reitityshierarkiasta. Esim.

- VPN-verkot (Virtual Private Network) voitaisiin toteuttaa oman etikettitason avulla (ks. myös 4.13.7 Virtuaaliset yksityiset verkot)

- RSVP:n kanssa saman QoS:n tietovirrat voidaan yhdistää yhden etiketin alaisuuteen (päälle “QoS-etiketti”)

Hierarkisessa toiminnassa etikettien jakelu LDP:llä voi edellä kuvatun esimerkin R3:n ja R7:n (“Remote LDP peers”) välillä tapahtua kahdella tavalla [2]:

- *Explicit peering*: LDP-yhteydet muodostetaan aivan samoin kuin välittömiin naapureihinkin.
- *Implicit peering*: LDP-yhteydet muodostetaan ainoastaan välittömiin naapureihin ja ylemmän hierarkiatason etiketit jaellaan koodattuna alemman tason etiketin attribuutiksi.

4.8 Toiminta ATM:n kanssa

MPLS:n toteutus ATM-kytkimissä voidaan tehdä eri tavoilla [1]:

- Poistamalla ATM Forumin kontrollitaso kokonaan (kuten Ipsilonin IP-kytkennässä)
- Rakentamalla järjestelmä, joka tukee sekä ATM Forumin että MPLS:n kontrollitasoa toisistaan riippumatta (SIN eli “Ships in the night”-tila)
- Yleisten ATM-palvelujen kanssa tarvitaan mitä ilmeisimmin integroitu malli jossa MPLS kykenee käyttämään ATM:n palveluja

Dokumentissa *Use of Label Switching With ATM* [10] on yhtenäinen selostus MPLS:n käytöstä ATM:n kanssa. Dokumenteissa *IP Address Resolution and ATM Signaling for MPLS over ATM SVC service* [14] ja *ATM SVC Support for ATM-LSRs* [16] on selostettu ATM:n SVC-palvelujen käyttöä MPLS:n toteutuksessa.

4.9 Toiminta Frame Relay -tekniikan kanssa

Dokumentissa *Use of Label Switching on Frame Relay Networks* [3] selostetaan yksityiskohtia MPLS:n käytöstä Frame Relay -tekniikan kanssa.

Frame Relay:ssa etikettinä käytetään siirtoyhteyserroksen DLCI-kenttää. Muu etiketteihin liittyvä tieto (esim. etikettipinosta muut kuin päällimmäinen etiketti), jota Frame Relay -kytkentä ei käytä, koodataan [4]:n mukaisesti. Frame Relay aiheuttaa joitain rajoitteita MPLS:n käyttöön: mm. TTL:n vähennys (FR-LSR:ien välillä) ja multipoint-to-point -toiminta eivät yleensä ole mahdollisia.

Toisiinsa yhteydessä olevat Frame Relay-LSR:t tarvitsevat full-duplex-yhteyden LDP:tä varten. Tälle yhteydelle pitää konfiguroida oma DLCI. TTL-kentän päivitys tehdään kuten on selitetty kappaleessa 4.13.5. Frame Relay -reitittimen MPLS-tuki edellyttää etikettikytkennän kontrollikomponentin toteutusta. Tämä käsittää pääasiassa etikettien luomisen ja ylläpitotoiminnot. Etikettitieto voidaan kommunikoida mahdollisesti useilla mekanismeilla (ensisijassa LDP:llä).

4.10 MPLS lähiverkossa

MPLS:n käyttöä lähiverkossa kuvataan dokumenteissa *Labels for MPLS over LAN Media* [7], *MPLS Label Stack Encoding on LAN Media* [9] ja *Comparison of MPLS LAN Encapsulation Proposals* [8].

Tyypilliset lähiverkkojen kytkentäteknikat kuten Ethernet ja Token Ring eivät ole luonteeltaan etikettityylisiä. Jos tällaisissa lähiverkoissa joudutaan käyttämään MPLS:n omaa etikettien kehysrakennekoodausta, edellyttäisi se ilmeisesti etikettien prosessointia ohjelmallisesti, mikä heikentäisi selvästi etikettien käytöstä saavutettavaa tehokkuusetua. Tämän välttämiseksi on ehdotettu etiketin koodaamista kehyksien vastaanottajakenttään. Koodaus tapahtuisi niin, että etiketeillä olisi yksiselitteinen olemassa olevien laitteiden kanssa päällekkäin menemätön MAC-osoitteeseen alkuosa. MAC-osoitteen loppuosaan voidaan sitten koodata etiketti. Etikettien pitää olla uniikkeja broadcast-alueen sisällä. [7]

Etikettien koodauksesta MAC-osoitteeseen on kuitenkin useita ongelmia, joiden välttäminen puhuu etiketin siirtoyhteyskerrospaketin sisään koodaamisen puolesta. Ylipäättään MPLS ei vaikuta kovin käyttökelpoiselta tekniikalta lähiverkko-ympäristössä. [8]

4.11 MPLS ja RSVP

RSVP on resurssien varaamiseen tarkoitettu protokolla ([23]). RSVP:hen on ehdotettu laajennusta jonka avulla MPLS-etikettejä voisi liittää RSVP-virtoihin. Tällöin LSR voisi päätellä paketin "varaustilan" (reservation state) etiketin avulla.

RSVP:hen tarvitaan kaksi uutta objektia:

- "RSVP_LABEL" kuljettamaan etiketti RSVP-viestissä
- "HOP_COUNT" TTL:n käsittelyyn

Esitetyssä tavassa jokaiseen RSVP-virtaan liitetään etiketti. RSVP-virta on yksisuuntainen tietovirta lähettäjältä yhdelle tai useammalle vastaanottajalle tietyssä IP-osoitteessa. Etikettien varaus tapahtuu alavirran LSR:ssä. Etiketit poistetaan jos niitä ei vahvisteta määräajassa "RESV"-viesteillä tai ne poistetaan erillisellä viestillä tai RSVP-yhteys katkaistaan.

Jos LSR:llä ei ole RSVP:n kautta resurssivarattua etikettiä jollekin reititettävälle paketille, niin se käyttää normaalia "paras-yritys"-etikettiä (best-effort), jonka se on saanut esim. LDP-viestinvälityksen kautta. [11] [12]

4.12 Eksplisiittinen reititys

Eksplisiittistä reititystä voidaan käyttää esim. kuormien tasaukseen. Eksplisiittinen reitti pitää MPLS:ssä muodostaa etikettien luontihetkellä. Tämän jälkeen ei reittiä kuitenkaan enää tarvitse liittää jokaiseen verkkokerroksen pakettiin. Eksplisiittinen reitti voidaan muodostaa:

- konfiguroimalla staattisesti

- sellaisen reititysprotokollan avulla, joka antaa sisääntulosolmulle mahdollisuuden tuntea koko käytettävä reitti

Jos käytetään eksplisiittistä reititystä, eivät polun varrella olevat solmut saa käyttää näihin paketteihin hajautettua (hop-by-hop) reititystä, koska tällöin saattaa muodostua silmukoita. Esimerkiksi jos jokin solmu polun varrella on toimintakyvytön, pitää reitti purkaa eikä solmua saa ohittaa reitittämällä eteenpäin verkkokerrosprotokollalla. [1]

Esityksen mukaan LDP:ssä vaaditaan, että kaikki MPLS-solmut pystyvät käyttämään eksplisiittistä reittiä vaikka eivät itse sellaista kykenisikään luomaan. [2]

MPLS-etikettejä voidaan liittää RSVP-virtoihin kuten on kuvattu luvussa 4.11. Eksplisiittinen etikettikytkentäinen polku on mahdollista luoda yhdistämällä tämä kyky eksplisiittisesti reititettyyn RSVP-varaukseen. Polun ensimmäinen solmu luo "RSVP PATH"-viestin ja liittää tähän "Explicit Route"-objectin. Tämän lisäksi solmu lisää viestiin "LABEL_REQUEST"-objectin. Polun viimeinen solmu kuittaa viestin "RESV"-viestillä, johon se liittää varaamansa etiketin. Viestin kulkiessa takaisin kohti polun alkupäätä, varaavat kaikki solmut polun varrella etiketin ja liittävät sen viestiin. [13]

4.13 Muita teknisiä kysymyksiä

4.13.1 Multipath

Samaan määränpään tarkoitettua liikenteen reititys useata vaihtoehtoista reittiä pitkin on mahdollista myös MPLS:n kanssa. Tästä aiheutuu kuitenkin helposti ylimääräistä etikettien käyttöä. LSR voi antaa jollekin tietovirralle yhden etiketin jokaista vaihtoehtoista reittiä kohden. Naapuri, joka saa tällaiselta LSR:ltä useampia etikettejä tietovirtaa kohden, voi käyttää näistä mitä tahansa. [1] [2]

4.13.2 Multicast

Multicast-liikenneteen toteutukseen liittyviä seikkoja ei ole vielä tämän raportin kirjoittamisen aikaan tarkasti kartoitettu. Multicast-reitityksen ensivaiheessa on rakennettava multicast-puita. Multicast-puuhun kuuluva LSR assosioi etiketin tähän puuhun ja välittää ko. etiketin multicast-puun isäntäsolmulleen. Lähiverkossa etiketti välitetään myös sisäsolmuille, jotta isäntä voi lähettää samalla etiketillä kaikille lapsilleen. LSR:t tallettavat multicast-etiketeille NHLFE:hen tarvittavat tiedot kaikista puuhun kuuluvista lapsisolmuistaan. [2]

4.13.3 Etikettikytkettyjen polkujen luonnin kontrolli

Etikettikytketyt polut (Label Switched Path eli LSP) voidaan ("Downstream label allocation"-tavassa) generoida joko uloslähtösolmuista alkaen tai yhtä aikaa kaikista solmuista. Uloslähtösolmusta alkavassa generoinnissa on hyvänä puolena etteivät solmut yritä allokoida epäyhteensopivia etikettejä toisin kuin kaikista solmuista alkavassa tavassa (= paikallisessa kontrollissa). Paikallisessa kontrollissa taas käynnistys tapahtuu nopeammin ja se on oletettavasti vikasietoisempi. [1]

Tämän raportin kirjoittamisen aikaan ei MPLS-arkkitehtuurin kuvauksessa ole vielä päätetty mitä seuraavasta kolmesta tavasta käytetään:

- Vaaditaan paikallinen kontrolli
- Vaaditaan kontrolli uloslähtösolmuista lähtien
- Sallitaan molemmat tavat

Dokumentti *A Proposed Architecture for MPLS* [2] sisältää liitteissään pitkäkötiä analyysit eri vaihtoehtojen hyvistä ja huonoista puolista. Samaa asiaa käsittelee LDP-protokollan näkökulmasta dokumentti *Two Modes of MPLS Explicit Label Distribution Protocol* [15].

4.13.4 Turvallisuus

MPLS:n yhteydessä palomuurit voivat tarvittaessa katkaista etikettipohjaisen reitityksen, jos katsotaan että etikettien tarjoama mahdollisuus kontrolloida liikenteen reittiä palomuurin takana on turvallisuusuhka. [1]

4.13.5 TTL

IP-paketeissa kulkee mukana TTL-kenttä, jonka arvoa vähennetään jokaisella edetyllä reitittimellä. Tämän avulla voidaan poistaa silmukkaan jääneitä paketteja. Myös traceroute-ohjelma käyttää tätä ominaisuutta hyväkseen määrittäessään paketin reitin.

Jos etiketit koodataan MPLS:n omalla otsikkotietueella, voidaan TTL:ää tukea. Aina ei etikettiin kuitenkaan voida (esim. ATM:n kanssa) koodata TTL-kenttää. Jos TTL:ää tukemattoman MPLS-alueen sisääntulosolmulla on käytettävissä tieto uloslähtösolmun saavuttamiseen tarvittavien hyppyjen määrästä, voi se vähentää TTL-laskuria ennen paketin edelleenreititystä (tai hylätä paketin jos laskuri meni nolliin). Traceroute:a ei nyky muodossa saada toimimaan TTL:ää tukemattoman MPLS-alueen läpi. [2]

4.13.6 PPP

Point-to-point Protocol eli PPP (RFC 1661) tarjoaa standarditavan eri protokollien datagrammien kuljettamiseen yhden linkkiyhteyden yli. Etikettien käyttö PPP:n yli edellyttää PPP:hen uutta "verkkokontrolliprotokollaa" (Network Control Protocol). PPP-yhteyden muodostukseen käytetään standardin määrittelemää LCP-protokollaa. Uusi MPLS Control Protocol eli MPLSCP toimii samalla periaatteella ja astuu kuvaan kun LCP on saanut yhteyden muodostettua. MPLSCP huolehtii etikettikytkennän käyttöönotosta PPP-yhteyden yli. [4]

4.13.7 Virtuaaliset yksityiset verkot

Rajatulle käyttäjäkunnalle tarkoitetut verkot (Virtual Private Network eli VPN) olisi melko yksinkertaista toteuttaa MPLS:n avulla. Tämän vuoksi MPLS:ään on ehdotettu VPN-tuen rakentamista. [18]

Tyypillisissä Intraneteissa tarvitaan turvallinen tapa sulkea ulkopuoliset pois verkosta ja tarjota yksityinen (epäuniikki) IP-osoiteavaruus. MPLS-runkoverkossa reitittimet

voisivat ylläpitää reititystaulua jokaista VPN:ää kohden. MPLS-runkoverkossa riittää, että kohdeosoitteet ovat uniikkeja sisääntulosolmussa, jotka liittävät etiketit IP-paketteihin.

Etikettien välittämistä (esim. LDP:llä) pitäisi VPN:ien takia laajentaa kuljettamaan mukanaan käyttäjäryhmän tunniste. Käyttäjäryhmien tunnisteet määriteltäisiin liitettäessä yksityistä LSR:ää MPLS-runkoverkkoon.

5. Yhteenveto

MPLS:n määrittely on tämän raportin kirjoittamisen aikaan jo pitkällä. Perusratkaisut on tehty ja tarvittavat protokollat määriteltä. Vaikka useita yksityiskohtia onkin vielä lyömättä lukkoon, on ilmeistä että tekniikka tullaan ottamaan käyttöön, koska sen takana on useita suuria reititinvalmistajia (mm. Cisco Systems).

MPLS:n tuomista hyödyistä suhteutettuna vaadittavaan uuden tekniikan rakentamiseen voi olla epäileväinen. Nykyiset reitittimet ovat jo melko optimoituja verkkokerrosreititykseen, joten MPLS:n tuoma tehokkuusetu on kyseenalainen. Jos tulevaa standardia aletaan kuitenkin soveltaa laajemmassa mittakaavassa, tuo se yhtenäisyyttä eri protokollien välille. Tietovirtojen ryhmittely tuo myös entistä paremmat mahdollisuudet kontrolloida liikennettä.

6. Lähteet

Internet-draft -dokumentit löytyvät osoitteesta <ftp://ftp.ietf.org/internet-drafts>

- [1] *A Framework for Multiprotocol Label Switching*, R. Callon et al, Internet Draft <draft-ietf-mpls-framework-02.txt>, November 1997.
- [2] *A Proposed Architecture for MPLS*, E. Rosen et al., Internet Draft <draft-ietf-mpls-arch-00.txt>, August 1997.
- [3] *Use of Label Switching on Frame Relay Networks*, A. Conta et al., Internet Draft <draft-ietf-mpls-fr-00.txt>, December 1997.
- [4] *MPLS Label Stack Encoding*, E. Rosen et al., Internet Draft <draft-ietf-mpls-label-encaps-00.txt>, November 1997
- [5] *Generic Label Distribution Protocol Specification*, E. Gray et al., Internet Draft <draft-gray-mpls-generic-ldp-spec-00.txt>, November 1997
- [6] *LDP Specification*, N. Feldman et al., Internet Draft <draft-feldman-ldp-spec-00.txt>, November 1997
- [7] *Labels for MPLS over LAN Media*, D. Bussiere et al., Internet Draft <draft-srinivasan-mpls-lans-label-00.txt>, August 1997
- [8] *MPLS Label Stack Encoding on LAN Media*, E. Rosen et al., Internet Draft <draft-rosempls-lan-encaps-00.txt>, November 1997
- [9] *Comparison of MPLS LAN Encapsulation Proposals*, E. Rosen et al., Internet Draft <draft-rosempls-lan-encaps-compar-00.txt>, November 1997
- [10] *Use of Label Switching With ATM*, B. Davie et al., Internet Draft <draft-davie-mpls-atm-00.txt>, November 1997
- [11] *Soft State Switching - A Proposal to Extend RSVP for Switching RSVP Flows*, A. Viswanathan et al., Internet Draft <draft-viswanathan-mpls-rsvp-00.txt>, August 1997
- [12] *Use of Label Switching With RSVP*, B. Davie et al., Internet Draft <draft-davie-mpls-rsvp-01.txt>, November 1997
- [13] *Explicit Route Support in MPLS*, B. Davie et al., Internet Draft <draft-davie-mpls-explicit-routes-00.txt>, November 1997
- [14] *IP Address Resolution and ATM Signaling for MPLS over ATM SVC services*, H. Esaki et al., Internet Draft <draft-katsube-mpls-over-svc-00.txt>, June 1997
- [15] *Two Modes of MPLS Explicit Label Distribution Protocol*, Y. Katsube et al., Internet Draft <draft-katsube-mpls-two-ldp-00.txt>, September 1997
- [16] *ATM SVC Support for ATM-LSRs*, N. Demizu et al., Internet Draft <draft-demizu-mpls-atm-svc-00.txt>, October 1997
- [17] *Stream Aggregation*, A. Fredette et al., Internet Draft <draft-fredette-mpls-aggregation-00.txt>, November 1997
- [18] *VPN support for MPLS*, J. Heinänen, Internet Draft <draft-heinanen-mpls-vpn-00.txt>, December 1997
- [19] *Scalability Issues in Label Switching over ATM*, Z. Wang & G. Armitage, Internet Draft <draft-wang-mpls-scaling-atm.00.txt>, July 1997
- [20] *Performance Issues in VC-Merge Capable MPLS Switches*, I. Widjaja & A. Elwalid, Internet Draft <draft-widjaja-mpls-vc-merge-00.txt>, July 1997
- [21] *OSPF version 2*, J. Moy, RFC 1583, March 1994
- [22] *A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4)*, Y. Rekhter & T. Li, RFC 1771, March 1995
- [23] *Resource ReSerVation Protocol (RSVP) – Version 1 Functional Specification*, R. Braden et al., RFC 2205, September 1997.