
LENTOKENTTÄSÄÄJÄRJESTELMÄN LÄHIVERKON SUORITUSKYKY

Selvitys lähiverkon suorituskyvyn riittävydestä. Toimeksiantanut Vaisala Oyj.



Ammattikorkeakoulun opinnäytetyö

Tietotekniikan koulutusohjelma

Riihimäellä, 25.4.2013

Vesa Mäki



RIIHIMÄKI
Tietotekniikan ko.

Tekijä	Vesa Mäki	Vuosi 2013
Työn nimi	Lentokenttäasääjärjestelmän lähiverkon suorituskyky	

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön tarkoitus on kartoittaa Vaisala Oyj:n projektina tuotetun lentokenttäasääjärjestelmän lähiverkon kuormitustasoa. Lisäksi kartoitetaan Case-verkon vasteaikoja järjestelmän normaalikuormalla ja operatiivisen toiminnan suurimmalla mahdollisella kuormalla. Tähtäimenä on varmistaa lupaukset, että järjestelmää voidaan laajentaa työasemien ja anturien puolesta vähintään 50 %:lla ilman muutoksia verkkoon.

Teoriaosuudessa selvitetään kytkimillä toteutetun Ethernet-verkon toimintaa ja käydään läpi suorituskyvyn mittauksen teoriaa ja käytäntöjä. Tarkastelun kohteena ovat myös mittauksissa käytettävät protokollat.

Työosuudessa kuvataan lentokenttäasääjärjestelmän toimintaa sekä Case-verkon rakennetta, ja näiden tietojen pohjalta määritellään sopivat mittauspisteet suorituskyvyn mittauksiin. Lisäksi määritellään operatiivisessa järjestelmässä esiintyvien videosuoratoistotoiminnon ja tiedostosiirtojen tuottaman verkkokuorman simulointi.

Eri mittauspisteissä tehdään suorituskyvyn mittauksia käyttäen hyväksi PRTG Network Monitor ja PingTester-ohjelmia. Verkkokuormaa simuloidaan hyödyntämällä Ostinato-ohjelmaa.

Tulosten perusteella lentokenttäasääjärjestelmää on mahdollista laajentaa 50 %:lla. Lisäksi verkon linkkien ja laitteiden aiheuttamat latenssit ovat hyvin pieniä eikä videosuoratoisto-toiminnon ja tiedostosiirron tuottamalla kuormituksella ole latensseihin havaittavaa vaikutusta.

Avainsanat Ethernet, kytkin, SNMP, suorituskyvyn mittaus

Sivut 52 s. + liitteet 6 s.

Riihimäki
Degree Programme in Information technology

Author	Vesa Mäki Year 2013
Subject of Bachelor's thesis	LAN performance of an airport weather observing system

ABSTRACT

The purpose of this Bachelor's thesis was to survey the load level on the LAN of an airport weather observing system developed in a project by Vaisala Oyj. In addition, response times in the Case-network were measured during the systems normal load and the maximum load over operative operation. The aim was to confirm, that it is possible to broaden the workstations and sensors by 50 % in the system, without causing alterations to the network.

The theory part investigates the operation of a switched Ethernet and presents the theories and practices of network performance measurement. Also protocols involved in the measurements are under study.

The practical section describes the functions of an airport weather observing system and the structure of the Case-network. Based on this information, appropriate measurement points were defined for network performance measurements. Additionally, the simulation of network loads produced by a video streaming service and file transfers in the final operative system is defined.

Performance measurements are carried out in these defined measurement points utilizing PRTG Network Monitor and PingTester software. Simulated network loads are produced by Ostinato software.

Based on the results, it was determined, that the airport weather observing system can be enlarged by 50 %. Also, the latencies caused by the links and devices in the network are minimal, and the load produced by the video streaming function and file transfers has no noticeable effect on the latencies.

Keywords Ethernet, switch, SNMP, performance measurement

Pages 52 p. + appendices 6 p.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO JA TAUSTAT	3
2	ETHERNET JA KYTKIMEN TOIMINTA	4
2.1	Ethernet-kehys eli MAC-kehys	4
2.2	Kytkimillä toteutetut lähiverkot.....	6
2.2.1	Kytkimen toiminta ja MAC-taulu.....	7
2.2.2	Cut-through ja store-and-forward	8
2.2.3	Kytkimen muisteista	9
2.2.4	Head-of-Line Blocking	9
2.3	Spanning Tree -protokollat.....	9
2.3.1	Spanning-tree-algoritmi	10
3	VERKON SUORITUSKYVYN MITTAUS.....	11
3.1	Verkon suorituskyvyn mittarit.....	11
3.1.1	Luotettavuus (Reliability)	12
3.1.2	Saatavuus (Availability).....	14
3.1.3	Kaistanleveys (Bandwidth)	14
3.1.4	Läpisyöttö (Throughput)	14
3.1.5	Käyttöaste (Utilization).....	16
3.1.6	Latenssi ja vasteaika (Latency and Response time)	17
3.1.7	Latenssin variaatio (Delay variation, jitter)	17
3.1.8	Virhe (error) ja hävikki (Loss)	18
3.2	Internet Control Message Protocol	18
3.2.1	Ping	19
3.2.2	Traceroute.....	20
3.3	Simple Network Management Protocol	20
3.4	Pakettikaappaus	21
3.4.1	NIC promiscuous mode	22
3.4.2	Pakettikaappauksen käytäntöjä.....	22
4	JÄRJESTELMÄKUVAUS	23
4.1	Lentokenttäsäätöjärjestelmän toiminta.....	23
4.2	Laitteet.....	23
4.3	Anturidata ja lähetyksintervallit	24
4.4	Case-verkon rakenne ja datapolut.....	25
4.4.1	Videosuoratoisto ja tiedoston siirrot.....	27
5	MITTAUKSET.....	28
5.1	Pakettikaappaus	28
5.2	Verkon kuormitus ja vasteaikojen mittaukset	29
5.2.1	Mittauspisteiden ja ajan määrittely.....	29
5.2.2	Mittausvälineet ja -ohjelmistot.....	31
5.2.3	Mittausjärjestelyt	32
5.2.4	Vasteaikojen mittausten parametrit	33
6	TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	35

6.1	Pakettikaappaus	35
6.2	Käyttöaste- ja kuormitusmittaukset	35
6.2.1	SW-01:n prosessorin ja muistin käyttö	36
6.2.2	SW-01:n linkkien kuormitus	38
6.3	Vasteaikojen mittaukset	43
6.3.1	Simuloitu verkkoliikenne	43
6.3.2	Vasteajat ja pakettihävikki	44
7	YHTEENVETO JA LOPPUSANAT	47
8	LÄHTEET	49

Liite 1	PROSESSORIN JA MUISTIN KUORMITUS SIMULOINNIN AIKANA
Liite 2	PAKETTIKAAPPAUKSEN SUODATETUT TULOKSET

BER	Bit Error Rate
BPDU	Bridge Protocol Data Unit
CDU	Central Data Unit
CPU	Central Processing Unit
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA/CD	Carrier Sense, Multiple Access with Collision Detection
CSV	Comma Separated Values
DDP	Dedicated Display Panel, datanäyttönä toimiva työasema
DRAM	Dynamic Random Access Memory
DST	Destination
DVI	Digital Visual Interface
FCS	Frame Check Sequence
FIFO-muisti	First In First Out -muisti
ICAO	International Civil Aviation Organization
ICMP	Internet Control Message Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IP	Internet Protocol
MAC	Media Access Control
MIB	Management Information Base
MTU	Maximum Transmission Unit
OID	Object Identifier
OSI-malli	Open Systems Interconnection Model
Rapid PVST+	Rapid Per-Vlan Spanning-tree Protocol
RFC	Request for Comments, IETF:n julkaisema muistio
RSTP	Rapid Spanning-tree Protocol
SFP	Small form-factor pluggable transceiver
SNMP	Simple Network Management Protocol
SPAN	Switched Port Analyzer
SRC	Source
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
VRRP	Virtual Router Redundancy Protocol
WMO	World Meteorological Organization
WS	Workstation

1 JOHDANTO JA TAUSTAT

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on kartoittaa Vaisala Oyj:n projektina tuotetun lentokenttäsäätöjärjestelmän lähiverkon kuormitustasoa. Työssä halutaan myös luoda kokonaiskuvaa verkkoliikenteen määrästä ja laadusta, jotta tulevaisuuden uusien projektien laitehankinnoissa osataan ottaa suorituskykyvaatimukset paremmin huomioon. Lisäksi kartoitetaan Case-verkon vasteaikoja järjestelmän normaalikuormalla ja operatiivisen toiminnan suurimmalla mahdollisella kuormalla. Kaiken kaikkiaan tähtäimenä on varmistaa lupaukset, että järjestelmää voidaan laajentaa työasemien ja anturien puolesta vähintään 50 %:lla ilman muutoksia verkkoon.

Opinnäytetyössä tutkitaan seuraavia suorituskyvyn mittareita, joista tehdään SNMP-protokollan avulla mittauksia määrättyissä mittauspisteissä verkossa: kytkimien prosessorin ja muistin käyttöastetta, linkin kokonaisläpisyttöä, ja linkissä välitettyjä paketteja sekunnissa. Verkosta mitataan myös vasteaikoja ja pakettien hävikkitasoa ping-ohjelmalla. Lisäksi selvitetään anturidataliikenteen laatua Wireshark-ohjelmalla, jotta saadaan selville anturidatan Ethernet-kehysien keskimääräinen koko. Tätä tietoa tarvitaan määriteltäessä vasteaikojen mittauksissa käytettävän paketin kokoa. Kaikki työssä käytetyt ohjelmistot ovat joko avoimeen lähdekoodiin pohjautuvia tai kaupallisten ohjelmien ilmaisversioita.

Aihe opinnäytetyölle syntyi Vaisala Oyj:ltä toimeksiantona lentokenttäosaston projektille. Opinnäytetyön toimeksianto tuli osana laajempaa osallistumista projektin lentokenttäsäätöjärjestelmän verkko-osion suunnitteluun, dokumentointiin ja toteutukseen.

Verkkosivuillaan www.vaisala.com yhtiö kertoo olevansa maailman markkinajohtaja teollisuus- ja ympäristömittauksessa 75 vuoden kokemuksella. Vaisala valmistaa havainto- ja mittauslaitteistoja sekä tuottaa palveluja valituille markkinoille liittyen ympäristön ja teollisuuden mittaustarpeisiin. Vaisalan palveluksessa työskentelee n. 1 400 henkilöä kaikkiaan 15 maassa. Päätoimipaikka Vaisala pitää Suomen Vantaalla.

2 ETHERNET JA KYTKIMEN TOIMINTA

Tässä opinnäytetyössä tarkastelun kohteena oleva lentokenttäasääjärjestelmä toimii päätoiminnoiltaan Ethernet-lähiverkossa, joka kytkeytyy yhteen kytkimillä. Järjestelmään kuuluu myös kaksi reititintä, joiden kautta päästään käsiksi ulkoverkkoihin, mutta reitittimet tai niiden läpi kulkeva verkkoliikenne eivät ole tarkastelun kohteena.

Nykyaikaisissa ns. yhteydettömissä tietoverkoissa data välitetään lähettäjältä vastaanottajalle sanomina. Jotta sanoma saadaan kuljetettua oikeaan paikkaan virheettömänä ja jotta se osataan lukea vastaanottopäässä, lisätään siihen lisäinformaatiota. Lähetysvaiheessa sanoma käy läpi eri käsittelyvaiheita eli eri OSI-mallin kerroksia. Jokaisella kerroksella sanomalle suoritetaan toimenpiteitä jonkin protokollan mukaan. Taulukkoon 1 on lueteltu OSI-mallin kerrokset. (Miller 2005, 22–25.)

Taulukko 1. OSI-mallin kerrokset.

7	Sovellus
6	Esitystapa
5	Istunto
4	Kuljetus
3	Verkko
2	Siirtoyhteys
1	Fyysinen

Kun kirjallisuudessa puhutaan käsitteistä tai protokollista eri OSI-mallin kerroksilla, selkeyden vuoksi sanomaa kuvataan eri termeillä. Kun sanomaa kuvataan kerroksella 2 eli esim. Ethernet-protokollan yhteydessä, puhutaan silloin kehyksestä (frame). Kerroksella 3 eli esim. IP-protokollan kerroksella puhutaan informaatiopaketista tai vain paketista (packet). Kun siirrytään TCP/UDP-protokollan yhteyteen eli OSI-mallin kerrokselle 4, kutsutaan sanomaa segmentiksi (segment). (Miller 2005, 23.) Silti, varsinkin jos lauseyhteys ei vaadi erityistä tarkennusta, on kirjallisuudessa vakiintunut käytäntö kutsua geneeristä verkkosanomaa paketiksi, ja niin tehdään myös tässä opinnäytetyössä.

2.1 Ethernet-kehys eli MAC-kehys

Kuten yllä on mainittu, Ethernet toimii OSI-mallin kerroksella 2. Sen tehtävä on huolehtia, että vierekkäisten verkkolaitteiden välisellä välisellä yhteydellä tai linkillä voidaan kuljettaa luotettavasti dataa eli Ethernet-kehysä (Miller 2005, 23). Jotta kehys löytää lähettäjältä vastaanottajalle, tarvitaan lisäinformaatiota kuten osoitetietoja. Jotta voidaan varmistaa, että vastaanotettu kehys on todella sama kuin lähetetty, tarvitaan virheetarkistusta. Nämä ja muut onnistuneen lähetyksen ja vastaanoton edellyttämät yksityiskohdat on otettu huomioon Ethernet-kehysformaattissa. (Reynders 2003, 54.) IEEE 802.3 standardi määrittelee MAC-kehys ja kehysformaatin perusrakenne on kuvattu taulukossa 2 (Fall 2011, 84).

Taulukko 2. MAC-kehysformaatti.

7 (Bytes)	1	6	6	2	0-1500	0-46	4
Preamble	SFD	DST	SRC	Length/ Type	Payload data	Pad	FCS

Kehyksen lähetyksessä ensimmäisenä on preamble eli alustusosa, jota käytetään vastaanottajan kellon synkronointiin. Se sisältää seitsemän tavua bittejä järjestyksessä 10101010. (Reynders 2003, 54.)

SFD (Start Frame Delimiter) on kenttä, joka ilmaisee vastaanottajalle, että kehyksen data alkaa ja seuraavaksi on tulossa osoitekenttien tiedot. SFD on vakio muotoinen bittijono 10101011. (Reynders 2003, 54.)

DST (destination) ja SRC (source) identifioivat lähettäjän ja vastaanottajan fyysiset osoitteet, joita yleisesti kutsutaan ”MAC-osoitteiksi”. MAC-osoitteet tavallisesti ilmoitetaan hexadesimaalinarjoina. Päätekohtaisten ns. unicast-osoitteiden lisäksi DST-osoitteena voidaan käyttää myös broadcast- ja multicast-osoitetta. Broadcast-osoite FFFFFFFF on osoite, jolla sanoma voidaan kohdistaa kaikille verkon päätteille. Multicast-osoitteella sanoma voidaan kohdistaa tietyille multicast-ryhmälle. (Reynders 2003, 54; Fall 2011, 85.)

Length/Type-kentällä on kaksi tarkoitusta. Alkuperäisessä 802.3 standardissa se kertoo varsinaisen hyötydatan koon. Standardin myöhempien päivitysten myötä kentällä ilmaistaan myös kehyksen sisältämän korkeamman protokollan tyyppi eli onko kyseessä esim. TCP/IP-verkoissa IPv4- tai IPv6-paketti vai ARP-kysely. Vastaanottaja erottaa kentän koko- tai tyyppi-kentäksi sen arvon perusteella. Jos arvo on suurempi tai yhtäsuuri kuin 1 536, kenttä indikoi tyyppiä, mutta jos arvo on 1 500 tai alle, indikoi se kokoa. (Fall 2011, 85.)

Payload data -kenttä käsittää kehyksen varsinaisen hyötydatan, joka sisältää ylemmän kerroksen protokollien tuottaman paketin eli esim. IP-paketin. Tavanomaisesti hyötydatan maksimi koko on 1 500 tavua, mutta on mahdollista käyttää pienempääkin kokoa minimissään 46 tavuun asti (ilman tag-tietoja). Hyötydatan maksimimäärää kehyksessä kutsutaan myös MTU:ksi (Maximum Transmission Unit). (Reynders 2003, 54.) Myöhemmin 802.3 standardin lisäyksiä peruskehysformaattiin ovat tulleet mm. protokollakohtaiset merkinnät eli ”tagit” kuten esim. VLAN ID tai QoS-prioriteetti, joiden vuoksi kehyksen maksimi koko voi vaihdella. Tämän hetkisen 802.3-2008 standardin mukaan kehys voi sisältää maksimissaan 482 tavua tag-tietoja. Näitä tavallista suurempia kehyksiä kutsutaan kirjekuorikehyksiksi (envelope frames) ja niiden koko voi kasvaa 2 000 tavuun asti. (Fall 2011, 86.)

Tilanteessa, jossa hyötydatan määrä ei ylitä 46 tavua, käytetään pad-kenttää täytteenä, jotta raja saavutetaan. Pad-kenttään lisätään satunnaista dataa ja tämä data sisällytetään FCS-kentän CRC-arvon laskentaan. Kun kehys vastaanottopäässä todetaan CRC-tarkistuksen jälkeen oikeaksi, hylätään pad-kentän data. Pad-kentän datan määrä tunnistetaan lenghentän arvon mukaan. (Reynders 2003, 54.)

Kuten yllä jo mainittiin, FCS-kenttä sisältää nelitavuisen CRC-tarkistearvon. FCS-nimityksellä viitataan menetelmään, jolla kehyksen eheys varmistetaan lähetyksessä ja vastaanotossa. Menetelmässä lähettäjä laskee CRC-arvon koko kehykselle ja lisää arvon FCS-kenttään. Vastaanottaja laskee saman CRC-arvon vastaanottamalleen kehykselle ja vertaa saamaansa arvoa FCS-kentän arvoon. Jos arvot ovat samat niin vastaanottaja voi todeta kehyksen olevan oikea ja datan eheää. CRC-arvo lasketaan IEEE/ANSI:n 802.3-2008 kokoelmaan sisällytetyn CRC32 -standardin mukaan. (Fall 2011, 86–88.)

Kaiken kaikkiaan perinteisen Ethernet-kehyksen datan minimi- ja maksimikoot medialla ovat 64 ja 1 522 tavua sisältäen 14 tavun otsikon ja neljän tavun CRC-tarkistuksen. Kuitenkin, koska medialla siirretään useita kehyksiä peräjälkeen, tulee yhden kehyksen lähettämisen kokonaistavumäärään laskea myös preamble (7 tavua) ja SFD (1 tavu) sekä interframe gap (IPG). IPG tarkoittaa aikaväliä (voidaan ilmaista myös tavuina), jolla tauotetaan peräkkäisten kehyksien lähetystä. Ilman tauotusta vastaanottopään piirit eivät ehdi palautua edellisen kehyksen vastaanotosta ja seuraavan kehyksen vastaanotto häiriintyy. IPG:ksi on määriteltä 12 tavun siirtoaika. Näin ollen yhden kehyksen siirtämiseen medialla vaadittava kokonaistavumäärä on minimissään 84 tavua ja maksimissaan 1 542 tavua. (Fall 2011, 88–89.)

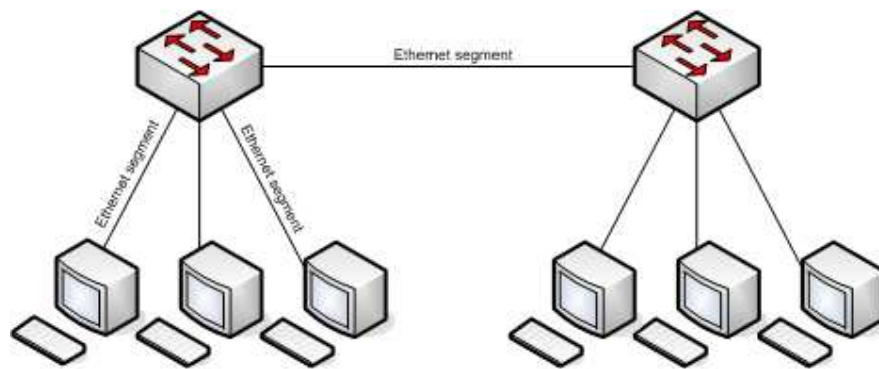
2.2 Kytkimillä toteutetut lähiverkot

Ethernet perustuu alunperin vuonna 1980 julkaistuihin standardeihin, mutta vasta Digital Equipment Corp.:n, Intel Corp.:n ja Xerox Corp.:n muodostaman yhteenliittymän ja muiden tahojen parantelun jälkeen se hyväksyttiin IEEE:n standardiksi 802.3. Tämän aikaista Ethernetiä kutsutaan yleisesti nimellä ”10Mb/s Ethernet” tai ”shared Ethernet”. Nimensä standardi sai tavasta, jolla päätelaitteet kytkettiin verkkoon. Kaikki päätteet kytkettiin yhteiselle jaetulle verkkosegmentille, jota pitkin päätteet kommunikoivat. Jaetun väylän ongelmana on, että se muodostaa ns. yhteisen törmäysalueen (collision domain) ja, että kaistanleveys jaetaan kaikkien päätteiden kesken. (Fall 2011, 80–83.)

Kyseinen ”shared Ethernet” toimi half duplex -tilassa ja sen nopeus oli rajoittunut 10 Mbit/s. Myöhemmin IEEE 802.3 standardi on käynyt läpi muutoksia ja parannuksia ja sen eri jälkiliittein nimetyt päivitykset ovat kasvattaneet nopeudet kymmeneen gigabitteihin sekunnissa. Esimerkiksi tässä lentokenttäsääjärjestelmässä käytetään Gigabit Ethernet -nimellä kulkevan IEEE 802.3z -standardin mukaista Ethernetiä. Parannusten johdosta Ethernet kykenee full duplex -liikennöintiin, jolloin linkillä voidaan siirtää sanomia molempiin suuntiin samaan aikaan.

Kaksisuuntainen samanaikainen liikennöinti kaksinkertaistaa Ethernet-segmentin kaistanleveyden ja samalla poistaa siitä törmäysten esiintymisen mahdollisuuden. Full duplex -liikennöinti vaatii, että Ethernet-verkko on muodostettu kytkimillä ja oikealla kaapeloinnilla. (Fall 2011, 94.)

Kun half duplex Ethernet-verkko toteutetaan jaetun väylän sijaan kytkimillä, päästään eroon yhdestä suuresta törmäysalueesta. Yhteisen väylän sijaan kytkinverkko koostuu joukosta väyliä eli linkkejä päätelaitteiden ja kytkimen välillä, jolloin jokainen linkki muodostaa oman Ethernet-segmenttinsä ja itsenäisen törmäysalueensa. Tämä tarkoittaa, että myös kaistanleveys jakautuu Ethernet-segmenteittäin, jolloin jokaiselle päätelaitteelle voidaan taata verkon nimelliskaistanleveys. Kuva 1 esittää kytkimillä toteutetun Ethernet-verkon esimerkitopologiaa. Linkkien ollessa full duplex -tilassa törmäysalueet lakkaavat olemasta ja CSMA/CD-menetelmän Collision Detection -toiminnallisuus voidaan poistaa käytöstä. Full duplex -liikennöinti edellyttää, että linkit ovat kaksipistelinkkejä (point-to-point) ja, että linkillä on oltava oma fyysinen mediansa molemmille lähetysuunnille. (Reynders 2003, 182; Fall 2011, 94.)



Kuva 1. Kytkimillä toteutettu Ethernet-verkko.

2.2.1 Kytkimen toiminta ja MAC-taulu

Kytkimen toiminta perustuu älykkääseen aktiiviseen toimintaan. Kytkimen kautta kulkevat päätelaitteiden väliset yhteydet eivät ole fyysisesti pysyviä, vaan kytkin aktiivisesti muodostaa yhteyden per kehys-periaatteella. Kun kehys saapuu päätelaitteelta kytkimelle, tarkastaa kytkin kehysen MAC-osoitteet. Kohdeosoitteen perusteella kytkin tietää mihin porttiin kehys ”kytketään” ja yhteys lähde- ja kohdeportteihin liitettyjen päätelaitteiden välillä muodostetaan vain tämän yhden kehysen lähetyksen ajaksi. (Reynders 2003, 182.)

Jotta kytkin osaa muodostaa lähde- ja kohdeporttien välisen yhteyden, on sen ensin tiedettävä mitkä päätelaitteet ovat liitettynä kuhunkin porttiin. Tämän informaation kytkin ns. oppii ajan kuluessa ja oppimisprosessin vuoksi kytkintä voidaan kutsua älykkääksi verkkolaitteeksi. Kun kytkin käynnistetään ensimmäisen kerran, se ei vielä tiedä verkon rakenteesta ja päätelaitteista mitään. Siksi vastaanottaessaan päätelaitteelta ensimmäisen

kehyksensä, se on yleislähetettävä (broadcast) kaikkiin kytkimeen liitettyjen päätelaitteiden portteihin, paitsi porttiin, josta kehys saapui. Samalla kytkin lukee lähdeosoitekentän MAC-osoitteen ja tallentaa osoitelähdeportti -yhteyden omaan kytkentätaulukkoonsa. Taulukko 3 kuvaa esimerkkiä kytkentätaulukosta. Kaikki kehykset, joiden kohdeosoitetta ei vielä löydy kytkentätaulukosta, yleislähetetään muille verkon päätelaitteille ja kaikki uudet lähdeosoite-lähdeporttiyhteydet tallennetaan kytkentätaulukkoon. Ajan kuluessa kytkin näin oppii kaikki päätelaitteiden MAC-osoitteet ja portit, joihin ne on liitetty. Kytkin osaa silloin pikakytkä kehykset suoraan lähdeportista kohdeporttiin vertaamalla kohdeosoitetta kytkentätaulukon lähdeosoite-portti -yhteyksiin, jolloin prosessorin kuorma vähenee ja tarve yleislähetää saapuvia kehyksiä vähenee huomattavasti. (Harrington 2007, 67.)

Taulukko 3. Esimerkki kytkimen kytkentätaulukosta.

Päätelaitteen MAC-osoite	Kytkinportti
00:14:51:64:83:3f	1
00:18:ae:12:b6:3c	1
00:14:51:64:83:40	5
00:18:ae:12:b6:95	0
21:14:ab:12:14:16	0
10:cd:ef:81:13:04	2
88:15:46:64:36:46	2

Koska verkot harvoin ovat täysin muuttumattomia eli päätelaitteita mahdollisesti käynnistellään ja sammutetaan jatkuvasti, saattavat kytkentätaulukon merkinnät vanhentua. Siksi kytkin jatkuvasti päivittää taulukkoa poistaen merkintöjä esim. silloin, kun päätelaite kytketään irti (tai sammutetaan), tai jos merkinnän MAC-osoitteesta ei ole saapunut kehyksiä pitkään aikaan. (Harrington 2007, 68.)

Kytkimen kytkentätaulukon merkinnöissä on mahdollista, että useampi MAC-osoite on yhdistettynä samaan lähdeporttiin. Näin voi olla, kun kytkimiä yhdistetään toisiinsa ja ketjutetaan. Ketjuttaminen on tapa, jolla verkkoa voidaan laajentaa ja segmentoida korkeammalla tasolla sekä samalla jakaa verkon kuormaa useamman kytkimen käsiteltäväksi. (Harrington 2007, 69.)

2.2.2 Cut-through ja store-and-forward

Kytkimillä on kaksi perinteistä arkkitehtuuria, joiden mukaan ne kytkevät kehyksiä. Aluksi käytettiin kytkimiä, jotka perustuivat cut-through -arkkitehtuuriin. Vastaanottaessaan kehyksen, cut-through -arkkitehtuurin kytkin tarkastaa vain kohdeosoitteen ja kytkee kehyksen välittömästi osoitetta kytkentätaulukossa vastaavaan porttiin tarkastamatta sitä mitenkään. Cut-through -arkkitehtuuriin perustuva kytkentäprosessi on hyvin nopea, mutta koska kehyksiä ei tarkasteta mitenkään, myös virheitä sisältävät paketit kytketään, mikä tuottaa verkkosegmenteille turhaa

liikennettä. (Nassar 2000, 302; Reynders 2003, 183.) Lisäksi jos kohdeverkkosegmentillä on jo liikennettä, kun cut-through -kytkin alkaa kytkeä sille kehystä, sillä ei ole muuta vaihtoehtoa kuin pakottaa kehysten törmäys (Reynders 2003, 183).

Tämän ongelman poistamiseksi kehitettiin store-and-forward -arkkitehtuuri, jossa kytkin tarkastaa vastaanotettaessa koko kehyyksen ja tallentaa sen FIFO-muistiin. Muistiin tallennus ja muistin purku voivat tuottaa viivettä kehyyksen siirtoon varsinkin, jos samalle päätelaitteelle on osoitettu useampi kehys samaan aikaan. Toisaalta, koska koko kehys tarkastetaan, voi kytkin suodattaa ja hylätä virheelliset paketit, jolloin säästetään verkkoresursseja. (Nassar 2000, 302; Reynders 2003, 183.)

2.2.3 Kytkimen muisteista

Kytkimet sisältävät useita eri muisteja, mutta kytkentätoimintoon käytetään DRAM-muistia. Kytkin jakaa DRAM-muistilohkon kahteen osaan: toista tarvitaan prosessorin muistina sen suorittaessa kytkimen ohjelmiston tehtäviä kuten kytkentätaulukon päivityksiä; toista käytetään kehyyksien lähetyksen ja vastaanoton puskurimuistina (I/O-buffer memory) eli muistina, jonne vastaanotetut kehyykset tallennetaan odottamaan tarkastelua ja vapaata lähetyshetkeä. (Cisco IOS Configuration Fundamentals 2006, FC-207.)

2.2.4 Head-of-Line Blocking

Riippumatta kytkinarkkitehtuurista kytkimissä saattaa esiintyä kehysten hävikkiä, kun väylillä on ruuhkaa. Kytkimet yrittävät välttää hävikkiä käyttämällä puskurimuisteja, joihin kehyykset asetetaan odottamaan väylän vapautumista (Barnes 2004, 40). Kuitenkin jatkuvan ylikuormituksen alla puskurit täyttyvät ja kehyykset, jotka eivät mahdu jonoon, on hylättävä. Esimerkiksi tilanne, jossa kytkimeen on liitetty yhtä nopeilla väylillä päätelaitteet A,B ja C. Molemmat A ja B lähettävät C:lle kehyyksiä jatkuvalla 70 % kapasiteetilla, joka tarkoittaa yhteensä 140 % kapasiteettia päätelaite C:n väylälle. Kytkin puskuroida kapasiteetin ylittävää 40 % osaa, mutta kuormituksen ollessa jatkuvaa, puskurin täytyessä se hylkää ylijäävät kehyykset. Tilannetta, jossa esiintyy hävikkiä, kun yhdelle kohdeportille yritetään kytkeä sen kapasiteettia suurempi määrä kehyyksiä, kutsutaan nimellä Head-of-Line Blocking. (Barnes 2004, 44.)

2.3 Spanning Tree -protokollat

Tässä Case-verkossa on verkkoliikenteelle monia vaihtoehtoisia kulkureittejä, ja käyttöön on otettu Cisco Systemsin Rapid PVST+ -protokolla. Kun suunnitellaan verkon laitteiden ja linkkien monitorointia ja suorituskyvyn mittaamista, on välttämätöntä ottaa huomioon Spanning-tree-protokollamääritykset. Määritykset määräävät mitä reittejä verkkoliikenne tulee kulkemaan, ja ennen kuin reitit ovat tiedossa, ei voida määrittää mittauspisteitä, joista suorituskykyä on tarkoituksenmukaista mitata.

Spanning-tree-protokolla (STP) on määritelty IEEE:n 802.1D standardissa ja sen tehtävä on taata silmukavapaa topologia kytkimiin perustuvissa Ethernet-lähiverkoissa. Vuonna 2004 protokollaa päivitettiin standardissa IEEE 802.1w ja uutta versiota kutsutaan Rapid spanning-tree -protokollaksi (RSTP). (Oppenheimer 2010, 136–137.) Rapid PVST+ -protokolla on Cisco Systems:n kehittämä versio IEEE:n 802.1w standardin RTSP-protokollasta (Catalyst 2960-S Configuration Guide 2010, 16-10).

Jotta OSI-kerroksen 2 Ethernet-verkko voi toimia ilman ongelmia vain yksi aktiivinen linkki voi olla käytössä kahden verkkoon kytketyn laitteen välillä. Useimmat aktiiviset linkit tuottavat silmukoita verkkoon, jolloin kehykset kulkevat verkossa loputtomasti syöden verkon ja sen laitteiden resursseja. (Catalyst 2960-S Configuration Guide 2010, 16-2.) Kuten luvussa 2.2.1 on kuvattu, kytkin päivittää kytkentätaulukkoaan kytkimelle saapuvien kehysten mukaan. Kun verkossa esiintyy silmukoita, sama kehys voi saapua kytkimelle monesta eri portista. Jos kytkin havaitsee saapuvalla kehyksellä MAC-osoitteen, jolla on kytkentätaulukossa yhteys eri porttiin, päivittää kytkin kytkentätaulukkoa. Taulukkoa päivitetään joka kerta, kun kytkin havaitsee uuden MAC-osoitteen ja verkko voi tämän vuoksi muuttua epävakaaksi. (Fall 2011, 102.)

2.3.1 Spanning-tree-algoritmi

Spanning-tree-protokolla käyttää matemaattista spanning-tree-algoritmia rakentaakseen toisiinsa kytketyistä kytkimistä puumaisen silmukavapaan rakenteen ja valitsee sille juuren. Puurakenne muodostetaan määräämällä kytkimien portit määrättyihin tiloihin:

- Root. Valittu välittävä portti, josta on lyhin reitti juurikytkimelle.
- Designated. Valittu välittävä portti jokaiselle Ethernet-segmentille.
- Alternate. Estetty portti, joka tarjoaa vaihtoehdoisen polun juurikytkimelle.
- Backup. Estetty portti loopback-konfiguraatiossa.

Jos jokin verkkosegmentti lakkaa toimimasta, laskee algoritmi puurakenteen polut uudelleen ja jos vaihtoehtoinen yhteys segmenttiin on olemassa, otetaan se käyttöön muuttamalla porttirooleja.

Kytkimet lähettävät toisilleen tasaisin väliajoin BPDU-paketteja, joilla ne saavat tietoa naapurikytkimistä ja niiden porteista. BPDU-paketit sisältävät mm. MAC-osoitteen, kytkimen prioriteetin, porttien prioriteetit ja polkukustannukset. Näitä tietoja käyttämällä kytkimet kollektiivisesti valitsevat verkon juurikytkimen ja jokaiselle Ethernet-segmentille juuriportin ja designated-portin. Kun Ethernet-segmentille on enemmän kuin yksi polku, määrää portin prioriteetti ja polkukustannus, että asetetaanko portti välittävään vai estävään tilaan. (Catalyst 2960-S Configuration Guide 2010, 16-2.)

3 VERKON SUORITUSKYVYN MITTAUS

Verkon suorituskykyä tavallisesti mitataan, jotta voidaan varmistua verkon yhdenmukaisesta ja ennustettavasta palvelutasosta. Mittaustuloksien pohjalta voidaan arvioida onko verkkoon tai sen konfiguraatioon mahdollista tehdä muutoksia, jotta suorituskykyä ja palvelutasoa voidaan parantaa. Suorituskyvyn mittauksella saatavasta datasta voidaan selvittämään mm. verkon normaalin suorituskyvyn tasoa (baseline), vallitsevia tai mahdollisesti tulevaisuudessa eteen tulevia ongelmia suorituskyvyssä, optimaalisia datan siirtonopeuksia, pullonkauloja ja vasteaikoja. (Della Maggiora 2000, 45.)

Verkon suorituskykyä mitataan keräämällä verkon laitteilta suorituskykyä mittaavaa dataa ja tallentamalla se tietokantaan tai tiedostoon. Datan kerääminen voidaan toteuttaa pääasiassa kahdella tavalla: aktiivisesti kyselemällä tai tapahtumakohtaisella raportoinnilla. Jos käytetään aktiivista kyselyä, suorituskyvyn mittausdata kerätään kyselemällä sitä verkkoon kytketyiltä laitteilta esim. käyttäen SNMP-protokollaa. Luku 3.3 esittelee tarkemmin SNMP-protokollaa. Kyselyt toteutetaan keskitetysti datan keruuseen omistetulta päätelaitteelta ja vastauksena saatu data tallennetaan tietokantaan, josta sitä voidaan myöhemmin hyödyntää raportoinnissa. Aktiivisen kyselyn etuna on, että sen avulla voidaan tuottaa yhdenmukaista dataa suorituskyvystä tasaisin väliajoin. Toisaalta jatkuva kysely voi ajanmittaan paisuttaa tietokannan kokoa, mikä hidastuttaa raporttien luontia. Ylisuurten tietomäärien jatkuva kysely verkon yli voi myös vaikuttaa kohdelaitteen tai verkon suorituskykyyn. (Della Maggiora 2000, 46.)

Verkon suorituskyvyn dataa voidaan kerätä myös tapahtumakohtaisella raportoinnilla. Tässä tavassa kohdelaitteiden suorituskyvylle määritellään rajat ja laitteet asetetaan luomaan tapahtumaraportteja mikäli jokin ennaltamääritetty raja ylittyy/alittuu. Jos kohdelaitteet eivät tuota tapahtumaraportteja voidaan verkon silloin todeta toimivan hyväksytyllä suorituskyvyllä. Tapahtumakohtaisella raportoinnilla vältetään datan keruun vaikutukset verkkoon tai kohdelaitteisiin ja selvittää vähemmällä hallinnalla. Tapahtumakohtaisten raporttien ongelma tosin on, että ne eivät välttämättä ole luotettavia. Raportteja saattaa hukkua matkalla, jolloin olennaista dataa verkon suorituskyvystä jää vastaanottamatta. (Della Maggiora 2000, 46.)

3.1 Verkon suorituskyvyn mittarit

Verkon suorituskyvyn mittausta ei ole vain kapasiteetin tai viiveiden mittaamista. Se käsittää mittareita (metrics) myös mm. käsitteille kuten toipuminen, luotettavuus, saatavuus, alttius väärinkäytölle tai käyttökatkosten hinta, jotka kaikki kertovat suorituskyvystä eri osaluonteiltaan. (Liotine 2003, 31–60.) Järjestelmän käyttäjien kannalta erityisesti luotettavuus ja saatavuus ovat tärkeitä. Linkin kokonaisläpisyttö, käyttöaste, latenssi ja latenssin variaatio, vasteaika, hävikki ja virhemäärä kertovat tarkemmin jonkin tietyn linkin suorituskyvystä. (Newman 2002; Liotine 2003, 52, 58.)

Suorituskykyä mitattaessa mittareiden tulisi olla räätälöity ja valittu mittauskohdekohtaisesti ja päämäärän mukaan, jota mittaamisella pyritään saavuttamaan. Muutoin tulosten tulkinta ja halutun informaation saaminen ei välttämättä onnistu. Lisäksi mittari tai mittaustapa ei saa vaihtua otettaessa mittauksia ajan kuluessa, jotta aikajaksojen välisiä tuloksia on mahdollista vertailla. Mittarin parametrien kuten datatyypin (esim. muistin määrä käytettynä vai vapaana), asteikon (esim. bitteinä vai tavuina) ja näytteenoton aikavälin on pysyttävä muuttumattomina. (Liotine 2003, 31.)

3.1.1 Luotettavuus (Reliability)

Luotettavuudella käsitetään sitä todennäköisyyttä, millä verkko tai sen komponentti toimii ongelmitta tietyssä määritellyssä ajassa (Liotine 2003, 36).

Mean time to failure (MTTF) on mittari, jolla mitataan keskimääräistä aikaa järjestelmän tai komponentin pystytyksestä hetkeen, kunnes se lopullisesti rikkoutuu. Jos järjestelmä on käyttökunnossa, kunnes sen käyttö lopetetaan, voidaan sanoa, että tehtäväaika (mission time) on sama kuin MTTF. (Liotine 2003, 37.)

Jos järjestelmää tai komponenttia käytetään ajoittain tai jaksollisesti, niin alkukäyttöönosta kuluneesta kokonaisajasta laskettavaa prosentiaalista osuutta, jolloin järjestelmä tai komponentti on käytössä, kutsutaan hyötyajaksi (duty cycle). Hyötyaika δ voidaan laskea seuraavalla kaavalla, jossa OT on kokonaiskäyntiaika:

$$\delta = \frac{OT}{MTTF} \quad (1)$$

Käyntiaikaa on esimerkiksi auton starttimoottorille aika, jolloin sitä pyöritetään polttomoottorin käynnistämiseksi; kiintolevyllä aika, jolloin se aktiivisesti lukee tai kirjoittaa levyille; verkon kytkimelle aika, joka sillä kestää kääntää saapuva kehys eteenpäin. Kaavalla voidaan laskea hyötyajan vaikutusta MTTF:ään. Jos kiintolevyllä luvataan MTTF-arvoksi 250 000 h 5 % käyttöasteella eli $\delta = 0,05$, niin kaksinkertaisella eli 10 % käyttöasteella MTTF-arvo jäisi vain 125 000 h. Järjestelmä tai komponentti siis hajoaa todennäköisemmin, mitä enemmän sitä käytetään. (Liotine 2003, 37.)

Vikaantuvuusaste tai vikatiheys (failure rate) F mittaa kuinka usein järjestelmä on poissa käytöstä tietyssä ajassa. Käyttökatko voi johtua joko vikatilasta tai etukäteen suunnitellusta huollosta. Puhutaan myös vikataajuudesta. Esimerkiksi kuinka monta vikaantumista järjestelmässä esiintyy 1 000 tunnin aikana. Vikatiheys voidaan arvioida kaavasta:

$$F = \frac{f}{MTTF} \quad (2)$$

jossa f on vikatiilojen määrä järjestelmän tehtäväaikana. (Liotine 2003, 37–38.)

MTTR eli Mean time to recovery on mittari, jolla tarkoitetaan keskimääräistä aikaa, joka kuluu korjauksiin tai yleisesti järjestelmän palauttamiseen toimintaan. MTTR voidaan esim. laskea yksinkertaisesti summaamalla kaikki korjauksiin ja järjestelmän palautuksiin tms. käytetty aika, ja jakamalla se käyttökatkojen määrällä. MTTR:ää voidaan käyttää järjestelmän palautusasteen μ (recovery rate) arvioinnissa. Palautusaste saadaan kaavasta:

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (3)$$

Matala MTTR tai korkea palautusaste μ vaikuttaa positiivisesti järjestelmän saatavuuteen. (Liotine 2003, 38.)

Mittari, joka kertoo järjestelmän tai komponentin keskimääräisen rikkoutumisaikavälin, on MTBF eli Mean time between failure. MTBF laskenta perustuu järjestelmän vikaantumistaajuuteen. Jos järjestelmän MTBF-arvo on alhainen, tulee se todennäköisemmin tarvitsemaan enemmän huoltoa ja varaosia. Korkean arvon järjestelmää voidaan mainostaa vähähuoltoisena ja korkealaatuisena. MTBF voidaan käsittää käänteisenä vikatiheytenä F , eli toisin sanoen, kun vikatiheys kertoo kuinka usein järjestelmä on poissa käytöstä, MTBF kertoo kuinka usein se on käytössä. Kaavana tämä voidaan esittää seuraavasti:

$$MTBF = \frac{1}{F} \quad (4)$$

MTBF:n avulla voidaan arvioida järjestelmän luotettavuutta, joka on todennäköisyys sille, että järjestelmä on toiminnassa ajan t ilman vikoja. Kaavasta:

$$R(t) = \exp\left(\frac{-t}{MTBF}\right) \quad (5)$$

saadaan luotettavuus $R(t)$. (Liotine 2003, 39–40.)

Luotettavuus ja saatavuus käsitetään helposti samaksi asiaksi, mutta niillä on eroa. Luotettavuus on siis todennäköisyys sille, että järjestelmä on toiminnassa tietynä aikavälinä. Saatavuus taas on todennäköisyys sille, että järjestelmä on saatavissa minä tahansa ajan hetkenä. Esimerkiksi jos tulostimella on kymmenen käyttäjää, jotka haluavat kaikki tulostaa samaan aikaan. Tulostin tulostaa 10 minuutissa moitteettomasti kaikki tulostimen jonoon tulevat kymmenen dokumenttia, jolloin luotettavuuden voidaan todeta olevan 100 %. Tulostin voi kuitenkin tulostaa vain yhden dokumentin kerrallaan ja käyttäessään minuutin per dokumentti, jää silloin saatavuus 10 % per käyttäjä. (Liotine 2003, 39–40.)

3.1.2 Saatavuus (Availability)

Saatavuus voidaan määrittää myös prosentiaalisena osuutena tehtävääjasta, jolloin järjestelmä tai verkko on todellisuudessa ollut käytössä. Saatavuus A voidaan laskea kaavalla:

$$A = \frac{MTBF}{(MTBF+MTTR)} \quad (6)$$

Voidaan myös puhua saavuttamattomuudesta $1 - A$. Saatavuutta A pitää muistaa tarkastella perspektiivistä. Jos lentokenttäjärjestelmän kriittisen verkkolaitteen MTBF arvo on 10 000 h ja MTTR:n arvo on 2 h, niin kaavasta voidaan laskea, että saatavuudeksi A saadaan 99,98 % ja saavuttamattomuudeksi $1 - A = 0,02$ %. Jos järjestelmä on toiminnassa kokonaisen vuoden eli 8 760 h, niin saavuttamattomuudeksi saadaan 1,75 h per vuosi. Tämän mittaisella katkoksellä tai häiriöllä saavutettavuudessa voi olla merkittävää vaikutusta lentokentän toimintaan. (Liotine 2003, 40.)

Saatavuutta voidaan käytännössä mitata mm. lähettämällä ICMP echo -viestejä sopivin aikaväleihin eri verkkolaitteille. Saatavuus A saadaan prosentteina kaavasta (Della Maggiora 2000, 52–53):

$$A = \left(\frac{\text{Vastaanotetut pingit}}{\text{Lähetetyt pingit}} \right) \times 100 \quad (7)$$

3.1.3 Kaistanleveys (Bandwidth)

Kaistanleveydestä puhutaan, kun esitetään kuinka paljon bittejä voidaan siirtää kahden pisteen välillä määritellyssä ajassa. Eli toisin sanoen puhutaan siirtoasteesta (transfer rate). (Liotine 2003, 54.) Tiedonsiirrossa kaistanleveydellä tarkoitetaan myös siirtokapasiteettia. Esimerkiksi IEEE 802.3z standardin mukaisen Gigabit Ethernet-linkin kaistanleveydeksi on määritetty 1 Gbit/s yhteen suuntaan.

Voidaan myös sanoa, että jokin tiedonsiirto vaatii onnistuakseen tietyn kaistanleveyden. Tämä tulee esiin mm. puheen tai videon reaaliaikaisessa siirrossa. (Liotine 2003, 54.) Esimerkiksi jos yhdellä linkillä kulkee samanaikaisesti 10 HD-videosuoratoistoa ja jokainen suoratoisto vaatii 12 Mbit/s IP-paketteina, niin vaadittava kokonaiskaistanleveys on 120 Mbit/s.

3.1.4 Läpisyöttö (Throughput)

Läpisyötöllä tarkoitetaan informaatiomäärää, joka kulkee järjestelmän tai esim. linkin läpi määritellyssä ajassa. Puhutaan joko verkkokuormasta kilo-, mega- tai gigabiteina sekunnissa (bit/s), tai datapaketteina sekunnissa (p/s). Yleensä bittimääristä puhuttaessa on kyse netto-määristä, eli kokonaiskuormasta on vähennetty yllämainittu overhead-informaatio. (Liotine 2003, 58.)

Läpisyöttö ja kaistanleveys eroavat toisistaan siinä, että kaistanleveys on teoreettinen maksimikapasiteetti, jolla informaatiota voidaan siirtää ja

läpisyttö on todellinen toteutunut siirtokyky esim. johdolla. Ideaalisesti läpisyttö olisi sama kuin kaistanleveys, mutta tämä ei ole koskaan mahdollista. Siirtojohdoilla siirretään aina myös ylimääräistä informaatiota, jota syntyy useista eri lähteistä ja sitä kutsutaan Overhead-informaatioksi. (Oppenheimer 2010, 35.)

Overhead-termillä tarkoitetaan mitä tahansa suorituksia, mm. ylimääräisiä kellojaksoja, sanomavälityksiä tai lisäinformaatiota, joita järjestelmän on suoritettava kyetäkseen prosessoimaan tai välittämään varsinaisen hyötykuorman. Vastaavaa ylimääräistä informaatiota lisäävät esim. verkkoprotokollat. Kun datahyötykuorma lähetetään verkkoa pitkin päätelaitteelta toiselle, jokaisella OSI-mallin kerroksella lisätään hyötykuorman oheen protokollan määrittämää lisäinformaatiota (esim. Ethernet-protokollan MAC-osoitetiedot ja virhetarkisteet tai IP-protokollan osoitetiedot), jota tarvitaan, että lähetys voidaan suorittaa onnistuneesti. (Liotine 2003, 54.)

Huomattavaa Ethernet-verkoissa on myös, että datahyötykuorman koko vaikuttaa overhead-informaation kokonaismäärään. Koska jokaiseen kehykseen tuotetaan protokollien puolesta overhead-informaatiota, joka on määrältään vakiota, lähetetään overhead-informaatiota enemmän käytettäessä pieniä hyötykuormia kuin suuria. (Oppenheimer 2010, 40.)

Moni muukin asia voi vaikuttaa heikentävästi läpisyttöön. Esim. operoiko linkki half vai full duplex -tilassa. Half duplex -linkki voi siirtää informaatiota vain yhteen suuntaan vuorollaan, kun vastaavasti full duplex -linkkillä data kulkee molempiin suuntiin samaan aikaan. Kun kyseessä on johtoja pitkin tapahtuvaa tiedonsiirtoa, jossa informaatio siirretään moduloimalla kantataajuussignaalia, ovat törmäykset mahdollisia half duplex -tilassa. Törmäys tapahtuu, kun kaksi tai useampi lähettäjä yrittää lähettää medially samanaikaisesti, jolloin viestit sekoittuvat ja ne on lähetettävä uudelleen. Uudelleen lähetys voi heikentää linkin läpisyttöä dramaattisesti, varsinkin jos törmäyksiä tapahtuu suuria määriä. (Liotine 2003, 54.) Myös muut häiriöt (esim. sähkömagneettiset häiriöt) johdossa, jotka tuottavat virheitä siirrettävään informaatioon, aiheuttavat uudelleen lähetystä tai hävikkiä ja näin ollen heikentävät kokonaisläpisyttöä. (Oppenheimer 2010, 35.)

Koska läpisyttöön vaikuttaa niin moni eri tekijä, sen laskeminen voi olla vaikeaa. Läpisyttöä voidaan arvioida seuraavalla kaavalla:

$$q_L = \left[\left(\frac{Q}{K} \right) - \sum_{i=1}^L \theta_i \right] \times d \quad (8)$$

Kaavassa q_L on linkin toteutunut (netto) läpisyttö protokollakerroksella L , Q on siirtotekniikan kokonaissiirtokapasiteetti, K on siirrettävien datavirtojen kappalemäärä, θ_i on overhead-informaation määrä linkin protokollakerroksella i , ja d duplex-kerroin. (Liotine 2003, 58.) Esimerkiksi, jos jokaisen protokollakerroksen tuottama overhead-informaation määrä on 11 kbit/s per kerros IP-kerrokselle asti (kerros 3, verkko), nettoläpisyttö yhdelle datavirralle 254 kbit/s

kokonaissiirtokapasiteetin linkillä on $q_3 = \left[\left(\frac{254}{1} \right) - (11 + 11) \right] \times d = 232 \frac{\text{kbit}}{\text{s}} \times d$. Fyysisellä kerroksella viitataan fyysiseen siirtoelementtiin, joten se ei tuota overhead-informaatiota, eli laskussa overhead-informaatiota tuottavat Siirtoyhteys-kerros ja IP-kerros. Duplex-kerroin d on $\frac{1}{2}$ jos käytössä on half duplex.

Laitevalmistajat puhuvat usein läpisyötöstä laitteidensa teknisissä tiedoissa, mutta esim. kytkimien kanssa, bittimäärien sijasta puhutaan pakettimääristä, joita kytkin pystyy maksimissaan käsittelemään sekunnissa. Valmistajien ilmoittamat luvut perustuvat mittauksiin, joissa pakettigeneraattoreilla tuotetaan koneellisesti kasvava määrä paketteja ja samalla tarkkaillaan, kuinka monta pakettia kytkin kykenee välittämään. Teoreettinen maksimi voidaan laskea jakamalla kaistanleveys pakettikoolla. Taulukko 4 esittää teoreettisen maksimin 1 Gbit/s väylälle. Pakettikoossa on huomioitu etumerkit, otsikkotiedot ja pakettien väliset odotusajat. (Oppenheimer 2010, 36.)

Taulukko 4. Teoreettinen maksimi siirtonopeus pakettia sekunnissa 1Gbit/s Ethernet-väylle.

Kehyksen koko (tavuissa)	1 Gbit/s Ethernet Max p/s
64	1 488 000
128	844 500
256	452 800
512	234 900
1 024	119 700
1 280	96 100
1 518	81 200

3.1.5 Käyttöaste (Utilization)

Käyttöasteella mitataan jonkin järjestelmän hyödyntämisastetta suhteessa teoreettiseen maksimikapasiteettiin. Mitattavalle yksikölle q voidaan laskea käyttöaste U kaavalla:

$$U = \left[\frac{q(\text{havaittu})}{q(\text{teoreettinen})} \right] \times 100 \% \quad (9)$$

Teoreettisella q :lla tarkoitetaan järjestelmän teoreettista maksimiläpisyöttöä, jossa on huomioitu overhead. (Liotine 2003, 52.) Esimerkiksi verkkoprotokollat Ethernet-verkossa tuottavat eri kerroksilla summautuvaa overhead-informaatiota otsikko- ja lopukekenttinä jokaiseen välitettävään viestiin, jotta viesti löytää lähettäjältä oikealle kohteelle. (Liotine 2003, 54.) Jos linkin kapasiteetti on 100 Mbs ja viestin lähettäminen vaatii 2 Mbs overhead-informaatiota, niin siirrettäessä viestiä 12 Mbit/s, on linkin käyttöaste $U = \frac{12}{100-2} \times 100 \% = 12.24 \%$.

3.1.6 Latenssi ja vasteaika (Latency and Response time)

Latenssiksi kutsutaan aikaa, joka signaalilta tai käytännöllisemmin datapakettilla kuluu sen kulkiessa verkon paikasta A pakkaan B. Latenssia mitataan yleensä millisekunneissa (ms). Latenssi kasvaa kumulatiivisesti, kun datapakettia siirretään verkkoa pitkin verkkolaitteelta toiselle ja siihen kohdistetaan prosessointia. Latenssin kasvuun vaikuttavat mm. salaus ja salauksen purku, verkkoreitin varrella olevien laitteiden määrä (network hops), reitittimien ja palomuurien pakettiprosessointi, linkkien kaistanleveyden pullonkaulat ja signaalin etenemisaika linkillä. (Liotine 2003, 56.)

Nykyaikaisissa Ethernet-lähiverkoissa, jotka operoivat kytkimillä, kytkimien sisällä tapahtuvan kehyksien siirron tuottama latenssi on hyvin pieni, varsinkin korkean laatu luokan kytkimissä: 64-tavun kehykselle noin 5-20 mikrosekuntia (μ s) (Oppenheimer 2010, 41).

Yleisesti verkon latensseja mitataan vasteajalla. Vasteaika voidaan käyttäjän näkökulmasta määrittää aikana, joka järjestelmällä kestää vastata käyttäjän kyselyyn. Käyttäjä huomaa korkean vasteajan esim. hitaasti latautuvista verkkosivuista tai Telnet-yhteyden hitaista näppäilykaiuista. (Oppenheimer 2010, 40–41.) Yleisin tapa vasteajan mittaamiseen on jokin ICMP-protokollaan perustuva ping-työkalu, jota kuvataan tarkemmin jäljempänä luvussa 3.2.1. ICMP-protokollaan perustuvaa mittausta verkon latensseista kuten verkkolaitteiden paketin prosessointiajoista, reitityksestä ja linkin välitysviiveestä, tulee kuitenkin pitää indikaatiivisena mittana. Palvelun tai asiakkaan näkökulmasta todellista vasteaikaa se ei kerro, koska mm. palvelimen prosessointiaikoja tai levyille kirjoitusviiveitä ei oteta huomioon. (Liotine 2003, 57.)

Mitattaessa verkon tarkkoja latensseja tehdään mittaukset yhdensuuntaisina (one-way latency). Vasteaikamittauksien (Ping/ICMP) perustuvanlaatuinen ongelma on, että mittaus kertoo vain kokonaislatenssin päätelaitteiden kahdensuuntaiselle kommunikoinnille (esim. päätelaitteelta A, päätelaitteelle B ja takaisin A:lle), mutta ei erottele latenssia suuntaansa. (Adhikari 2003, 1.) Ei voida sanoa varmasti, että ping-työkalulla mitattu latenssi 100ms olisi 50+50 ms. Latenssi voi olla myös 10+90ms.

3.1.7 Latenssin variaatio (Delay variation, jitter)

Latenssin variaatiolla tai huojunnalla tarkoitetaan verkkoliikenteen latenssin vaihtelua. Verkon yli kulkevan datavirran pakettien saapumisajan voimakas huojunta voi tuottaa ongelmia varsinkin suoratoistopalveluiden, kuten VoIP-puheluiden, kanssa. (Liotine 2003, 56.) Jos verkossa on esimerkiksi puhe- ja videosuoratoiston kanssa samaan aikaan purske-tyyppistä dataa, voivat purskeet tuottaa suoratoiston latenssiin huojuntaa, joka voi edelleen aiheuttaa puheluihin ja videoihin pätkimistä (Oppenheimer 2010, 41).

3.1.8 Virhe (error) ja hävikki (Loss)

Virheeksi katsotaan yleisesti dataa, joka jollain tavalla muuttuu matkallaan lähettäjältä vastaanottajalle. Virheitä paketteihin voivat tuottaa siirtoteiden erilaiset fyysiset ongelmat kuten signaalien kohina, ylikuuluminen tai vaimentuminen. Loppukäyttäjälle data voi näkyä korruptoituneena myös silloin, kun useampana pakettina lähetetty data saapuu vastaanottajalle väärässä järjestyksessä. Keskittimillä (network hub) rakennetuissa Ethernet-verkoissa on mahdollista esiintyä törmäyksiä, kun liian moni verkkoon kytketty laite yrittää samaan aikaan lähettää jaetulle linkille. Törmäys tuottaa kehyksiin virheitä, minkä johdosta ne on uudelleen lähetettävä eli on esiintynyt hävikkiä. (Liotine 2003, 57–58.)

Verkoissa voi ilmetä data- tai pakettihävikkiä, jos datareitillä esiintyy siirto-ongelmia tai ruuhkaa. Kuten luvussa 2.2.4 on esitetty, ruuhkaa esiintyy silloin, kun linkin kaistanleveys eri riitä sille tarjotun data- tai pakettimäärän siirtämiseen. Paketit asetetaan jonoon puskuriin ja sen tullessa täyteen loput paketit hylätään ja ne katoavat. (Liotine 2003, 57.)

Hävikki heikentää verkon suorituskykyä ja kokonaisläpisyöttöä, mutta erityisesti siitä kärsivät äänen ja videon suoratoistopalvelut. Toistosta tulee herkästi pätkivää ja säröistä, ja varsinkin äänestä voi olla vaikea saada selvää. Verkossa siirrettyä datassa esiintyvää virheastetta (BER) tyypillisesti mitataan virhepaketien prosentuaalisena osuutena kokonaispakettimäärästä. (Liotine 2003, 57–58.)

3.2 Internet Control Message Protocol

IP-protokolla ryhmään on sisällytetty IETF:n RFC792:ssa määritelty ICMP-protokolla, jonka tarkoitus on tarjota keino kerätä tietoa verkon pakettien kuljetusvirheistä ja datagrammien prosessointivirheistä. Useimmat tuntevat sen kuitenkin paremmin pääasiassa verkkopolkujen saavutettavuuden testaamiseen soveltuvana protokollana käytettäessä ping- tai traceroute-työkaluja. (Miller 2005, 127.)

Standardi määrittelee 13 viestiformaattia eli viestiä, joista kaksi on jo vanhentunut. ICMP-paketti sisältää ensin IP-otsikon ja sen perään ICMP-otsikon. ICMP-otsikon kolme ensimmäistä kenttää ovat samat kaikissa formaateissa. Tyypki-kenttä (8 bittiä) sisältää koodin, joka indikoi viestiformaatin. Taulukko 5 esittää tyypki-koodit ja niitä vastaavat viestiformaatit. (Miller 2005, 127–128.)

Taulukko 5. ICMP-otsikon tyypikentän koodit.

Tyypki-koodi	ICMP-viesti
0	Echo reply
3	Destination unreachable
4	Source quench
5	Redirect
8	Echo
11	Time exceeded

12	Parameter problem
13	Timestamp
14	Timestamp reply
15	Information request (vanhentunut)
16	Information reply (vanhentunut)
17	Address mask request
18	Address mask reply

Seuraavalla Koodi-kentällä (8 bittiä) tarkennetaan viestiformaattia ja tarjotaan lisäinformaatiota. Taulukko 6 esittää tarkentavat koodit ja niiden merkitykset.

Taulukko 6. Koodi-kentän koodit ja niiden merkitykset.

Koodi	Merkitys
0	Net unreachable
1	Host unreachable
2	Protocol unreachable
3	Port unreachable
4	Fragmentation needed and DF set
5	Source route failed

Koodi-kentällä voidaan tarkentaa esim. tyyppin 3 (Destination unreachable) informaatiota kertomaan tarkemmin mikä verkon tai laitteen elementti on saavuttamattomissa. Kolmas yhteinen ICMP-otsikon kenttä on tarkastussumma (Checksum). (Miller 2005, 128.) Taulukko 7 esittää esimerkin ICMP-paketin otsikkorakenteesta, kun käytetään Ping-ohjelmaa ja echo tai echo reply -viestiä (Reynders 2003, 112).

Taulukko 7. ICMP-otsikko echo ja echo reply -viestille. Jokaisen kentän yllä on kerrottu kentän vaatima bittimäärä.

0	4	8	16	24	31
Tyyppi (8/0)		Koodi (0)		Tarkastussumma	
Tunniste			Järjestysnumero		
Vapaavalintainen datahyötykuorma					
...					

3.2.1 Ping

Ping-työkalulla voidaan selvittää kohdelaitteen saatavuutta verkossa sekä kohdelaitteen verkkopolun vasteaikoja. Ping käyttää toiminnassaan tyyppin 8 ja 0 ICMP-viestejä. Kohdelaitteelle lähetetään tyyppin 8 echo-viesti, joka vastaanotettaessa generoi vastauksena tyyppin 0 echo reply -viestin, jossa lähde- ja kohde-IP-osoitteet vaihtavat keskenään paikkaa. Echo-viesti voi sisältää tunniste- ja järjestysnumerokentät (molemmat 16 bittiä) sekä datahyötykuormakentän. (Miller 2005, 128, 132.)

Vasteajan ping-työkalu saa laskemalla kuluneen ajan echo- ja echo reply -viestin lähtemis- ja saapumisajankohtien välissä. Lähettäessään echo-viestin, lähettäjä käynnistää laskurin ja pysäyttää sen saadessaan echo-

reply -viestin vastauksena. Kuten kohdassa 3.1.2 on mainittu, saatavuutta voidaan mitata ping-työkalulla lähettämällä kohdelaitteelle jatkuvasti echo-viestejä tasasin väliajoin. (Miller 2005, 128, 132.)

3.2.2 Traceroute

Toisinaan on mahdollista, että echo-viesti ei koskaan löydä kohdelaitteelle, vaan esim. reitityssilmukan vuoksi jää kiertämään verkkoa pitkiksi ajoiksi tai jää sirpaloituneena odottamaan uudelleen kokoamista liian kauan. Jotta viestin lähettänyt laite saisi tiedon tapahtuneesta, sisältää echo-viesti Time-to-live -kentän. TTL-kenttä sisältää numeroarvon, jota vähennetään yhdellä joka kerta, kun echo-viesti saapuu seuraavalle reitittimelle. Kun TTL-arvo saavuttaa arvon nolla, eikä viesti ole vielä päässyt määränpäähänsä, generoi reititin Time-exceeded -viestin. Tässä tilanteessa viesti sisältää koodin 0 (Time-to-live exceeded in transmit). Myös silloin, jos sirpaloitunutta viestiä ei ehditä koota uudestaan määrittelyssä ajassa, generoidaan Time-exceeded -viesti, mutta silloin tyypiksi asetetaan 1 (Fragment reassembly time exceeded). (Miller 2005, 130.)

Traceroute-työkalu käyttää hyödyksi Time-exceeded -viestejä selvittääkseen verkkopolun saatavuutta ja vasteaikoja. Työkalu lähettää kohdeosoitteeseen järjestyksessä kolmen UDP-segmentin sarjoja, joiden TTL-kentän numeroarvoa kasvatetaan lähetysvuorossa olevan paketin mukaan, kunnes ne pääsevät perille. Järjestyksessä ensimmäisen sarjan viestien TTL-kentälle annetaan arvo yksi, seuraavalle kaksi, sitten kolme jne. Tästä johtuen, jokainen verkkopolulla sijaitseva reititin vastaa Time-exceeded -viestillä, kun se sille saapuu segmenttisarja, jonka TTL-arvo vähentyy nolnaan. (Miller 2005, 133.)

3.3 Simple Network Management Protocol

SNMP on monikäyttöinen sovelluskerroksen protokolla, joka tarjoaa viestiformaatin, joka mahdollistaa agentti-manageri -tapaisen toimintamallin. SNMP on osa laajempaa viitekehystä, jota kutsutaan nimellä Network Management Framework (versio 3), ja joka on dokumentoitu muistioon RFC 3410. Viitekehys sisältää: datan määrittelykielen nimeltään Structure of Management Information, eli SMI:n; määrittelyt hallintainformaatiolle, jota kutsutaan nimellä Management Information Base, tai lyhyesti MIB; protokollan määrittelyksen (SNMP). (Miller 2005, 634–635.)

SNMP:stä on julkaistu kolme versiota: SNMPv1, SNMPv2 ja SNMPv3. Versioista kukin on pohjautunut ja pyrkinyt parantamaan edellistä, mutta Millerin mukaan vielä vuonna 2005 SNMPv1 (kuvattu muistiossa RFC 1157) oli yhä kaikkein laajimmalle levinnein. (Miller 2005, 639)

Protokollaa hyödynnetään, jotta päästään käsiksi verkon laitteen tila- ja hallintatietoihin. Laite ylläpitää tietoja omassa virtuaalisessa tietokannassa, eli yllä mainitussa MIB-tietokannassa. MIB:n

rakennuspalikkoja ovat Object Identifier -muuttujat eli OID:it, jotka ovat sidoksissa laitteen järjestelmiin, alijärjestelmiin, yksittäisiin tilatietoihin ja parametreihin. OID:iin sidottuja asioita voivat olla esim. prosessorityyppi, vapaan muistin määrä, ajettavat prosessit tai fyysinen portti. OID:iin liittyy myös määriteltyjä attribuutteja, jotka osoittavat OID:lle mm. staattisia (kuten linkin nopeus) tai dynaamisia (esim. reititustaulumerkintä) parametreja tai määritelmiä (kuten vaatimus tehdä jatkuvia mittauksia linkillä kulkevien pakettien määrästä). OID:iin liitetyn tiedon arvoa voidaan kysellä tai päivittää käyttämällä SNMP-protokollaa ja manageria. (Miller 2005, 630–632.)

Managerilla tarkoitetaan verkon hallintajärjestelmää tai hallintaohjelmistoa. Kun hallittavalta laitteelta halutaan saada tietoja, ottaa manageri yhteyttä laitteella toimivaan agenttiin ja kyselee siltä haluamansa OID:n tilan tai arvon. SNMPv1:n mukaisesti käytetään viestejä Get tai GetNext, joiden yhteydessä ilmoitetaan haluttu OID-muuttuja. Agentti tietää laitteen OID:it, käy lukemassa tiedon MIB-tietokannasta ja lähettää tiedon takaisin managerille viestillä Response. Manageri voi myös saman prosessin avulla lukemisen sijasta muuttaa jonkin OID-muuttujan arvoa, esimerkiksi linkin nopeutta, viestillä Set. Agentti voidaan lisäksi määrittellä automaattisesti ilmoittamaan jonkin ennalta määrätyn OID:n arvon tai tilan muutoksesta, kuten linkin yhteyksatkoksista, epäonnistuneista kirjautumisyrityksistä tai muista huomiota vaativista tapauksista. Tämän kaltaista, jostain tapahtumasta seuraavaa toimenpidettä, ikään kuin liipaisua, kutsutaan nimellä trap. (Catalyst 2960-S Configuration Guide 2010, 30-1.) (Miller 2005, 631.)

3.4 Pakettikaappaus

Koska tässä opinnäytetyössä halutaan selvittää lentokenttäsääjärjestelmän anturidatapakettien keskimääräinen koko, on omiaan käyttää pakettikaappausa. Pakettikaappaus tai pakettianalyysi on keino, jolla voidaan analysoida verkossa liikkuvia paketteja yksityiskohtaisesti ns. lennosta. Pakettikaappaus suoritetaan siihen omistetulla tietokoneohjelmalla ja prosessi koostuu kolmesta osa-alueesta: keruu, muunto ja analyysi. (Sanders 2007, 2–3.)

Keruu-prosessissa tietokoneen, jolla pakettikaappausohjelmistoa ajetaan, verkkoadapteri liitetään verkkosegmentille, jonka pakettiliikennettä halutaan analysoida. Ohjelmisto asettaa verkkoadapterin tilaan (promiscuous mode), jossa se voi vastaanottaa kaikki medialta saapuvat paketit raakana binääridatana. Promiscuous mode -tilasta lisää luvussa 3.4.1. Seuraavaksi pakettikaappausohjelmisto lukee kaapatun raakan binääridatan ja muuntaa sen luettavaan muotoon. Lopuksi muunnettua dataa voidaan analysoida ja tarkastella eri protokollien kerroksilta ja poimia haluttuja tietoja. (Sanders 2007, 3.)

3.4.1 NIC promiscuous mode

Promiscuous mode -termillä viitataan verkkoadapterin tilaan, missä se hyväksyy prosessoitavaksi kaikki sille saapuvat Ethernet-kehukset.

Tavallisessa toiminnassaan verkkoadapteri tarkistaa kaikkien sille saapuvien kehysten MAC-kohdeosoitekentän ja vertaa kohdeosoitetta omaansa. Vertailun perusteella se päättää onko kehys tarkoitettu sille itselleen vai ei, eli hyväksytäänkö vai hylätäänkö kehys. Hyväksytyt kehukset siirretään jatkoprosessointiin ja hylätyt tiputetaan.

Jos pakettikaappaus suoritetaan verkkoadapterin normaalitilassa, joissain tapauksissa tämä voi tuottaa vääristyneen katsauksen verkossa liikkuvista kehyksistä, koska tulos silloin sisältäisi vain verkkoadapterille itselleen kohdistetut kehukset. (Wireshark wiki 2012).

3.4.2 Pakettikaappauksen käytäntöjä

Kuten yllä selvitettiin tulee pakettikaappauksen suorittava tietokone kytkeä sille verkkosegmentille, jonka verkkoliikennettä halutaan tarkastella. Eri teknologioilla toteutetut verkot vaativat eri menetelmiä pakettikaappaukselle. Yksinkertaisimmillaan pakettikaappauksen voi toteuttaa keskittimillä (hub) toteutetussa lähiverkossa. (Sanders 2007, 16.) Keskitin on verkkolaite, jolla päätelaitteita voidaan kytkeä yhteen ja se toimii ikään kuin toistimena. Se kopioi jokaisen vastaanottamansa kehuksen ja lähettää ne ulos kaikista porteistaan. (Sanders 2007, 8.) Tämän vuoksi liittämällä pakettikaappari keskittimeen, vastaanottaa sen verkkoadapteri kopion kaikista verkossa välitettävistä paketeista. (Sanders 2007, 16.)

Jos verkko on toteutettu kytkimillä, onnistuneen pakettikaappauksen tuottaminen ei ole yhtä suoraviivaista. Kuten luvussa 2.2.1 on kerrottu, kytkin rakentaa muistiinsa kytkentätaulun kaikkien siihen liitettyjen laitteiden MAC-osoitteista ja porteista. Taulua hyödyntämällä kytkin osaa välittää sille saapuvat Ethernet-kehukset ulos oikeasta portista destination-MAC-osoitteen mukaan ja näin käyttää resurssejaan tehokkaasti. Pakettikaappauksen kannalta tämä toiminta tuo esille ongelman, koska kytkimeen liitetyle pakettikaappauspääteelle välitetään vain sille itselleen kohdistetut kehukset. Tämän ongelman kiertämiseksi, kytkimellä suoritettava port mirroring -toimintoa. Lyhykäisyydessä port mirror -toiminto peilaa kaikki kehukset valituista lähdeporteista valittuun kohdeporttiin. (Sanders 2007, 16.)

4 JÄRJESTELMÄKUVAUS

Tässä luvussa käydään läpi järjestelmän rakennetta, konfiguraatiota ja laitteita. Yksi modernilta lentokentältä vaadittava perusosa on riittävän kattava sääjärjestelmä, jolla kerätään tietoja lentokentällä vallitsevista olosuhteista. Lentokentän säätilan tunteminen on välttämätöntä, jotta esim. lennonjohto, lentäjät ja muu lentokentän henkilöstö osaavat tehdä oikeita päätöksiä liittyen lentokentän turvallisuuteen ja keskeisiin toimintoihin. (Vaisala lentosääjärjestelmä 2012.)

4.1 Lentokenttä-sääjärjestelmän toiminta

Case-verkossa toimiva sääjärjestelmä koostuu yksinkertaistettuna antureista, kahdennetuista palvelimista, jotka toimivat laskentayksikköinä (CDUA/CDUB) ja henkilöstön työasemista ja datanäyttöistä (WS ja DDP). Anturit, joita on sijoitettu erityisesti kiitoteiden ympäristöön, tekevät jatkuvia mittauksia vallitsevista olosuhteista ja lähettävät tiedot Ethernet-lähiverkon yli palvelimelle. Palvelin käsittelee antureilta saapuvaa raakadataa ja laskee siitä erilaisia johdannaistietoja ja julkaisee tiedot käyttäjien saatavaksi.

Lentokentän meteorologisessa toimistossa henkilöstön käytössä on kahdenlaisia työasemia: WS-työasemia ja DDP-datanäyttöjä. WS-työasemat pyytävät palvelimelta tarvitsemiaan säätietoja ja esittävät ne erilaisilla näytöillä. WS-työasemilla voidaan hallinnoida sääjärjestelmää ja sillä mm. luodaan myös erilaisia ICAO:n ja WMO:n määrittelemiä raportteja. Raportit, joita ovat esim. METAR, SPECI, SIGMET, AIRMET ja SYNOP, ovat maailmanlaajuisesti julkaistavia sääsanomia, joita mm. lentäjät kuuntelevat. DDP-työasemat sen sijaan ovat itsenäisiä datanäyttöjä, jotka näyttävät reaaliaikaista anturidataa. (Projekti dok. System Description, 234, 252–253.)

4.2 Laitteet

Case-verkossa kytkimiä on kahdelta valmistajalta: Cisco Systems:lta ja Transition Networks:lta. Cison valmistamat kytkimet ovat mallia Catalyst 2960S-48TS-L ja luvun 4.4 kuvassa 2 esiteltävistä kytkimistä niitä ovat SW-01 - SW-06. Kytkinmalli on suunnattu keskisuurille yrityksille tai sivukonttoreihin access-tason kytkimeksi. 2960-S-malli on ns. hallinnoitava kytkin eli kytkintä voidaan konfiguroida toimimaan halutulla tavalla. Cisco ilmoittaa kytkimen teknisissä tiedoissa suorituskyvystä seuraavat tiedot (Cat2960 Data Sheet 2011):

– Väliytiskaistanleveys	88 Gbit/s
– Full duplex -väliytiskaistanleveys	176 Gbit/s
– Siirtoaste: 64-tavun paketti	77.4 Mp/s

Case-verkossa Cison kytkimillä kytkimillä kytketään verkkoon kaikki sisälaitteet eli palvelimet ja työasemat.

Verkossa käytetty toinen kytkinmalli on Transition Networks valmistama SISGM1040-244-LRT, joka on pieni ankariin olosuhteisiin ja teollisuuskäyttöön tarkoitettu kytkin. Kuvassa 2 esitellyistä kytkimistä niitä ovat SW-12 - SW-30 ja niitä on sijoitettu yksi jokaiselle anturiasemalle. Ciscon kytkimen tapaan SISGM1040-244-LRT on myös hallinnoitava kytkin, mutta sen konfigurointimahdollisuudet ovat huomattavasti suppeammat. Teknisissä tiedoissa suorituskyvystä ilmoitetaan vain, että kytkimen kytkentäverkko kykenee 16 Gbit/s full duplex -välityskaistanleveyteen. (SISGM1040-244-LRT Data Sheet 2012.) Anturiasemalla tarkoitetaan laitekokonaisuutta, joka verkkoliikenteen näkökulmasta sisältää itse anturilaitteen, sarjaliikennemuuntimen, ja yllä mainitun lähiverkkokytkimen. (Projektin dok. Network Design, 568.)

Tutkimuksessa käytetään muutamia järjestelmään kuulumattomia mittaus- ja simulointityöasemia. Mittaus- ja videosimulointiPC:iksi valjastetaan toimeksiantajan tarjoamia kannettavia tietokoneita. MittausPC:nä käytetään HP:n mallia EliteBook 2560p, jossa on integroitu Intelin 82579LM Gigabit Ethernet -verkkoadapteri, ja videosimulointiPC:nä käytetään Dell:n mallia Latitude D630 myöskin integroidulla Gigabit Ethernet-verkkoadapterilla. Lentokenttäsäätäjärjestelmän osana toimitettavat työasemat ovat mallia Hewlett-Packard Compaq Elite 8300 integroidulla Intelin 82579LM Gigabit Ethernet -verkkoadapterilla. Kahta samanmallista, mutta järjestelmään kuulumatonta työasemaa, käytetään myös simulointitarkoituksiin siirtosimulointiPC1:nä ja -PC2:na.

4.3 Anturidata ja lähetysintervallit

Erilaisia antureita, jotka tuottavat järjestelmälle dataa, on mm. tuulen nopeudelle ja suunnalle, ilman lämpötilalle, kosteudelle ja paineelle, näkyvyydelle, pilven korkeudelle ja sademäärälle. Anturi on kytketty sarjakaapelilla muuntimeen ja lähettää dataa tietyin intervalein, jonka muunnin kapseloi UDP-segmenteiksi ja lähettää eteenpäin verkkoon. Jokainen sarjaliikennemuunnin asetetaan lähettämään UDP-segmentit eri multicast IP-osoitteeseen ja UDP-porttiin. Taulukossa 8 on listattu eri antureiden multicast IP-osoitteita, UDP-kohdeportteja ja lähetysintervalleja.

Taulukko 8. Anturidatapakettin kohde IP-osoitteet, UDP-kohdeportit ja lähetysintervallit (Projektin dok. System Description, 239 – 260).

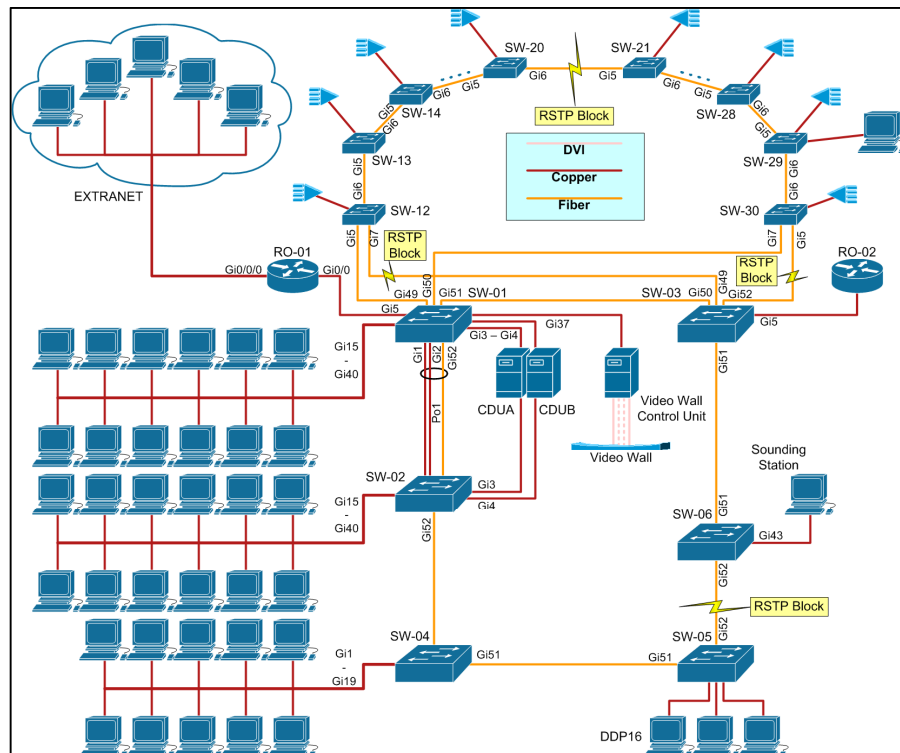
Anturi	Multicast-osoite	UDP-kohdeportti	Lähetysintervalli
Lämpötila, kosteus, paine ja sademäärä	239.53.10.20	12106	60 s
Tuulen nopeus ja suunta	239.53.10.18, 239.53.10.14	12107, 12108	3 s
Näkyvyys	239.53.10.19, 239.53.10.17, 239.53.10.13	12103, 12104, 12105	15 s
Pilven korkeus	239.53.10.12	12102	30 s

Taulukon 8 tietoja tarvitaan, jotta voidaan varmistaa, että pakettikaappauksen tuloksessa on kaikkia verkossa antureiden lähettämiä datapaketteja.

4.4 Case-verkon rakenne ja datapolut

Kuten luvussa 2 on mainittu, testattavana oleva lentokenttäasäijärjestelmä operoi pääasiassa omassa Ethernet-lähiverkossaan. Tämä tarkoittaa, että dataliikennettä välitetään OSI-mallin kerroksella 2 kytkimien avulla ja reititystä tarvitaan vain, kun välitetään järjestelmän tuottamaa säädettä ulkopuolisille osapuolille. Verkko on suunniteltu verkkohierarkkian näkökulmasta litteäksi, jotta sen rakenne ja hallinta säilyvät mahdollisimman yksinkertaisena. (Projektin dok. Network Design, 537.) Verkon kaikki linkit ovat IEEE 802.3z mukaisia Gigabit Ethernet -linkkejä ja kytkimien väliset yhteydet on toteutettu optisilla 1310 nm full duplex single mode -valokuiduilla ja SFP-vastaanotinmoduuleilla. (Projektin dok. Network Design, 572.)

Kuva 2 esittää verkon topologian, mutta huomautettavaa on, että se sisältää vain ne työasemat, palvelimet ja laitteet, jotka kuuluvat lentokenttäasäijärjestelmään. Operatiivisessa käytössä verkkoon liittyy myös muita työasemia, mutta ne eivät kuulu tämän tutkimuksen laajuuteen. Yleisesti huomautettakoon, että tähän opinnäytetyöhön sisällytetyt järjestelmää tai verkkoa esittelevät kuvat ovat viittavaa ja esimerkillisiä, mutta kuvaavat järjestelmän toimintaa olennaisilta osin todennukaisesti. Ymmärrettävyyden ja luettavuuden parantamiseksi yksityiskohtia on jätetty pois.



Kuva 2. Case-verkon topologia (Projektin dok. Network Drawing).

Verkko jakautuu kahdeksi eri valokuituringiksi, joiden yhdyspisteinä toimivat SW-01 ja SW-03. Toiseen ringiin kytkeytyvät anturit ja toiseen työasemat. Palvelimet ja reitittimet kytkeytyvät yhdyspisteisiin. (Projektin dok. Network Design, 539.)

Tässä lentokenttäjärjestelmässä perustoiminnan edellyttämää dataa liikkuu lähiverkossa kolmea polkua.

- Polku 1. Antureilta UDP multicast -segmentteinä CDUA-palvelimelle.
- Polku 2. Antureilta UDP multicast -segmentteinä DDP-työasemille.
- Polku 3. CDUA-palvelimelta TCP unicast -segmentteinä WS-työasemille ja takaisin.

Lisäksi suurta kuormaa verkkoon tuottaa järjestelmään kuuluva videosuoratoistotoiminto ja ajoittaiset tiedostosiirrot toisiin järjestelmiin. (Projektin dok. System Description, 234, 252–253.)

RSTP-määritykset jakavat normaaliajossa molemmat kuituringit yhteensä neljäksi eri haaraksi ja määräävät SW-01:n juurikytkimeksi. (Projektin dok. Network Equipment Config.)

- Haara a. kytkimeltä SW-01 kytkimelle SW-20.
- Haara b. kytkimeltä SW-01 kytkimelle SW-21.
- Haara c. kytkimeltä SW-01 kytkimelle SW-05.
- Haara d. kytkimeltä SW-01 kytkimelle SW-06.

Tämä tarkoittaa, että vaihtoehtoisista kytkimien välisistä linkeistä huolimatta, anturiringin ja työasemaringin risteyskohdaksi valikoituu SW-01. Palvelimista CDUA on määrätty ensisijaiseksi ja se kytkeytyy verkkoon kahdella verkkoadapterilla. Toisella kytkimeen SW-01 ja toisella kytkimeen SW-02. Näistä kahdesta verkkoadapterista vain toinen on kerrallaan aktiivinen ja ensisijaiseksi on määrätty SW-01:een kytketty verkkoadapteri. CDUA-palvelin päivystää toimettona. (Projektin dok. System Interface Description, 582.)

Verkon topologian ja yllä mainittujen ehtojen vallitessa voidaan todeta, että:

- Polun 1. verkkoliikenne kulkee haaraa a. ja haaraa b. pitkin kytkimen SW-01 linkin Gi3 kautta CDUA:lle.
- Polun 2. verkkoliikenne kulkee myös ensin haaroja a. ja b. pitkin kytkimelle SW-01 ja sitten joko suoraan tai haaran c. kautta työasemille.
- Polun 3. verkkoliikenne kulkee haaraa c. pitkin SW-01:n kautta, koska CDUA:n vaihtoehtoinen - kytkimeen SW-02 kytketty - verkkoadapteri ei ole aktiivinen normaaliajossa.

4.4.1 Videosuoratoisto ja tiedoston siirrot

Edellä mainitut videosuoratoistotoiminto ja tiedostosiirrot tuottavat omat lisäkuormansa verkkoon. Tällä kuormalla voi olla merkitystä varsinkin vasteajan mittausten suhteen. Videosuoratoisto käsittää erillisen järjestelmän, jonka avulla jokaiselta työasemalta voidaan jakaa ruutu yhdelle suurelle videoseinälle. Samanaikaisia suoratoistoja voi olla käytössä enintään 64 kpl ja laadultaan ne voivat olla maksimissaan koodattu resoluutiolle 1920x1080 / 60Hz. Koodauksena on H.264 baseline profile 4.2 encoding, joka voi tuottaa maksimissaan 12 Mbit/s datavirtaa (Projektin dok. Factory Acceptance Test, 10). Videoseinää hallinnoi oma järjestelmänsä, joka sisältää neljä kappaletta näytönohjainyksiköjä ja jokainen näytönohjain tuottaa kuvan 1/4 osalle videoseinästä. Videoseinällä näytettäviä suoratoistoja voidaan täysin kustomoida kokonsa ja sijoituksensa puolesta ja haluttaessa on mahdollista, että kaikki 64 suoratoistoa asetetaan yhdelle neljäsosalle videoseinästä eli yhden näytönohjainyksikön prosessoitavaksi. Verkon kannalta tämä tarkoittaa sitä, että yhdelle 1 Gbs Ethernet-linkille voidaan maksimissaan tuottaa 64 x 12 Mbit/s kuorma. (Projektin dok. Video Back Projection Wall Appendix D, 489.)

Videosuoratoisto-toiminto tuottaa liikennettä pääsääntöisesti verkon haarassa c. Videoseinän hallinnointijärjestelmä näytönohjaimineen on kytketty SW-01:een neljällä 1 Gbs:n linkillä, yksi linkki jokaista näytönohjainyksikköä kohti, ja videoseinä on kytketty DVI-kaapeleilla suoraan näytönohjaimiin (Projektin dok. Network Drawing). Näin ollen nämä max 64 kpl suoratoistoa, joiden lähteinä ovat esim. työasemat, kuormittavat kukin niin omaa työasemansa ja SW-01:n välistä linkkiä/polkua, että yhdessä SW-01:n ja hallinnointijärjestelmän välisiä linkejä.

Tiedostosiirrot järjestelmän operatiivisessa käytössä vaihtelevat. Niitä on suuria ja pieniä, säännöllisiä ja epäsäännöllisiä, kuten esim:

- Tuulikeilaimen alle megatavun datasiirrot kerran kymmenessä minuutissa (Projektin dok. Wind Profiler System Description, 338–339).
- Radioluotausdatan useiden gigatavujen kokoisten varmuuskopioiden siirrot kerran vuodessa (Projektin dok. Sounding System Description, 284).
- Viikottaiset virustorjuntaohjelmiston päivityksen tuottamat muutaman kymmenen megatavun siirrot (Projektin dok. System Description, 261).

5 MITTAUKSET

Tarkoituksena on mitata lentokenttäsjärjestelmän verkolle aiheuttamaa kuormaa. Kuormaa mitataan määrätyistä kohdista verkkoa, jotka ovat oleellisia verkon toiminnan ja rakenteen kannalta. Mittauspisteet ja mitattavat suureet on selostettu tässä luvussa.

Lentokenttäsjärjestelmän antureiden tuottama data on aikakriittistä. CDU-palvelimet laskevat antureilta saapuvasta datasta johdannaistietoja ja mikäli datan siirrossa esiintyy suuria viiveitä, on mahdollista, että palvelimella ajettavat laskenta-algoritmit häiriintyvät. Tämän vuoksi mitataan myös verkossa esiintyviä latensseja. Latenssimittauksista saadaan myös sivutuotteena dataa mahdollisesta hävikistä.

Luvussa 1 määritellään, että järjestelmää on voitava laajentaa työasemien ja anturien puolesta vähintään 50 %:lla ilman muutoksia verkkoon. Tähän perustuen määritellään, että tulokset ovat hyväksyttäviä mikäli arvot jäävät alle 50 % verkon kokonaiskapasiteetista.

5.1 Pakettikaappaus

Pakettikaappauksella selvitetään sensoridatan suurin kehyskoko, jonka perusteella voidaan määrittellä vasteaikojen mittauksessa käytettävän ICMP-paketin koko.

Kuten luvussa 4.4 on mainittu, järjestelmän toiminnallisuuden näkökannalta merkitsevin verkkoliikenteen solmukohta on kytkin SW-01. Kytkimen linkeistä erityisesti linkki CDUA:lle on merkitsevin, koska sen paketteja kaappaamalla voidaan tarkastella koko lentokenttäsjärjestelmän verkkoliikennettä, niin anturidataa kuin palvelimen ja työasemien välistä dataliikennettä. Käyttämällä oikeanlaisia suodatimia, saadaan tästä suuresta määrästä pakettiliikennettä esiin tarkastelun arvoinen liikenne eli anturidataliikenne.

Järjestelmäkuvauksen taulukon 8 mukaan pisin datan lähetyksintervalli antureilla on 60 sekuntia, joten pakettikaappauksessa mittausajanjaksoksi valitaan 70 sekuntia, jolloin voidaan varmistaa, että jokaiselta anturityypiltä saadaan paketti eikä kaappaustulos paisu hankalan suureksi käsitellä.

Pakettikaappaus suoritetaan mittausPC:ltä käyttämällä Wireshark-protokolla-analysointiohjelmaa. Wireshark-ohjelmalla asetetaan kaappausasetuksista mittausPC:n verkkoadapteri vastaanottamaan Promiscuous mode -tilassa.

MittausPC kytketään SW-01 -kytkimeen. Kytkimelle käynnistetään SPAN-sessio (port mirror), jotta mittausPC voi vastaanottaa kopion jokaisesta CDUA-palvelimen linkillä kulkevasta kehyksestä.

Pakettikaappauksesta suodatetaan näkyville vain haluttu anturidata. Tämä toteutetaan asettamalla näyttösuodatimia. Ensiksi, kuten luvussa 4.4 on

kerrottu, koska anturidata lähetetään multicast-UDP-segmentteinä, asetetaan suodatin näyttämään vain multicast-liikennettä. Toiseksi, koska järjestelmässä toimiva VRRP-protokolla kommunikoi multicast-segmenttein, asetetaan toinen suodatin suodattamaan pois kaikki VRRP multicast-osoitteeseen 224.0.0.18 suunnatut segmentit. Näin suodatetussa tuloksessa on näkyvillä vain anturidatapaketteja ja tämä voidaan käsin varmistaa vertailemalla mittaus tuloksen pakettien UDP-kohdeportteja listaukseen.

5.2 Verkon kuormitus ja vasteaikojen mittaukset

Verkon kuormitusta mitattaessa käytetään mittaussuureina kytkimen prosessorin ja muistien käyttöastetta prosentteina, linkillä siirrettävän kokonaisläpisyöttöä bitteinä sekunnissa sekä linkillä kulkevien pakettien määrää sekunnissa. Kytkimen prosessorin ja muistin kuormitus selvitetään osana kytkimien kuormituksen kokonaiskuvaa. Kokonaisläpisyöttö mittaa varsinaisen hyötydatan lisäksi myös kaikkien protokollakerrosten tuottaman overhead-informaation. Overhead-informaatio tulee ottaa mukaan mittaukseen, koska se on välttämätöntä tiedonsiirrolle. Kokonaisläpisyöttö kertoo vain datan määrästä sekunnissa, joten kokonaiskuvan tarkentamiseksi mitataan myös samalla pakettien määrää sekunnissa.

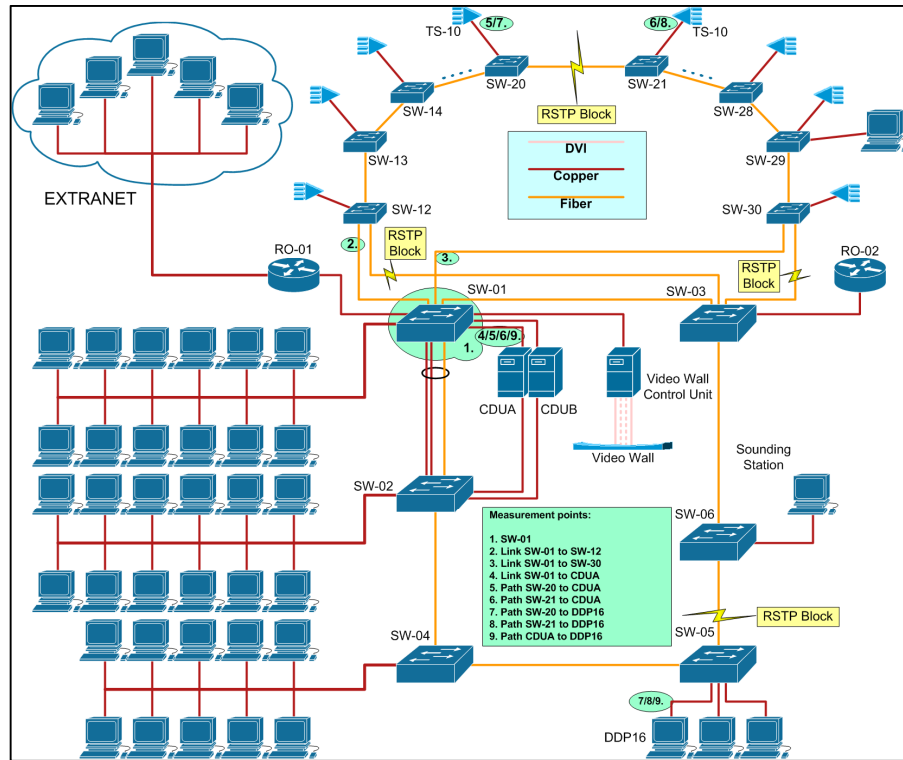
Verkon luotettavuutta tai saatavuutta ei käsitellä tässä tutkimuksessa, koska riittävän pitkät seuranta-ajat eivät ole mahdollisia projektin aikataululla.

Vasteajat mitataan millisekunneina ja kadonneiden mittauspakettien määrä kertoo hävikistä.

Kerätty data esitetään kuormitusmittauksissa graafisena kuvaajana ja vasteaikamittauksissa taulukkomuodossa.

5.2.1 Mittauspisteiden ja ajan määrittely

Mittauspisteiksi valitaan verkon pisteet, joiden kautta voidaan olettaa järjestelmän toiminnan kannalta tärkeimmän kuorman ja pakettimäärän kulkevan. Näiden pisteiden valintaan vaikuttavat verkon fyysinen rakenne, Spanning-tree-protokollan määrittelyt ja lentokenttäsäätöjärjestelmän toimintaperiaate. Kuva 3 esittää mitattavat pisteet verkkotopologiassa.



Kuva 3. Mittauspisteet Case-verkossa.

Luvun 4.4 järjestelmäkuvauksen pohjalta voidaan vetää johtopäätös, että täyttääkseen luvussa 1 määritetyn tutkimuksen tarkoituksen, mittauspisteiksi valitaan SW-01:stä ja sen linkeistä tehtävät mittaukset. Vasteaikojen mittauksien polut määräytyvät RSTP-määrittämisistä ja ne ovat yhdenmukaiset luvussa 4.4 mainittujen datapolkujen kanssa. Taulukko 9 listaa jokaisen mittauspisteen ja siitä mitattavat mitaussuureet.

Taulukko 9. Käyttöasteen ja vasteaikojen mittauspisteet.

Mittauspiste	Suure	Lisätieto
1. Laite: SW-01	Proessorin käyttöaste (CPU utilization), %	Mitataan kytkimen prosessorin ja muistin kuormitusta. Kytkimen SW-01 kautta kulkee kaikki järjestelmän verkkoliikenne.
	Muistin käyttöaste (memory utilization), %	
2. Linkki: SW-01 --- SW-12	Kokonaisläpisyöttö (throughput), kbit/s	Verkkokuorma anturiringin haaralta a. Pääasiassa anturidataa.
	Paketteja sekunnissa (packets per second), p/s	
3. Linkki: SW-01 --- SW-20	Kokonaisläpisyöttö, kbit/s	Verkkokuorma anturiringin haaralta b. Pääasiassa anturidataa.
	Paketteja sekunnissa, p/s	
4. Linkki: SW-01 --- CDUA	Kokonaisläpisyöttö, kbit/s	Verkkokuorma CDUA-palvelimelle. Linkissä on ennustettavasti verkon suurin kuorma.
	Paketteja sekunnissa, p/s	
5. Polku: TS-10 --- CDUA	Vasteaika (response time), ms	Anturidatan polku haaran a. etäisimmältä sarjaliikennemuuntimelta CDUA-palvelimelle.
	Pakettihävikkitaso (packet loss rate), %	
6. Polku: TS-11 --- CDUA	Vasteaika, ms	Anturidatan polku haaran b. etäisimmältä sarjaliikennemuuntimelta CDUA-palvelimelle.
	Pakettihävikkitaso, %	
7. Polku: TS-10 --- DDP16	Vasteaika, ms	Anturidatan polku haaran a. etäisimmältä sarjaliikennemuuntimelta haaran c etäisimmälle DDP-työasemalle.
	Pakettihävikkitaso, %	
8. Polku: TS-11 --- DDP16	Vasteaika, ms	Anturidatan polku haaran b. etäisimmältä sarjaliikennemuuntimelta haaran c etäisimmälle DDP-työasemalle.
	Pakettihävikkitaso, %	
9. Polku: CDUA --- DDP16	Vasteaika, ms	CDUA-palvelimen ja haaran c. etäisimmältä työaseman välisen liikenteen polku.
	Pakettihävikkitaso, %	

Kaikissa mittauksissa mittausajanjaksoksi asetetaan 12 h. Näytteenottotaajuudeksi verkkokuorma- ja käyttöastemittauksissa asetetaan PRTG:n alin mahdollinen kyselyväli eli 30 s ja vasteajan mittauksissa yksi sekunti (1 s).

Mittaukset pisteissä 1 - 5 voidaan ottaa samalla kertaa yhdestä mittausajanjaksosta. Pisteiden 6 - 10 mittaukset on suoritettava erillisinä jaksoina, koska mittausPC:tä joudutaan fyysisesti siirtämään.

5.2.2 Mittausvälineet ja -ohjelmistot

Verkkokuorma- ja käyttöastemittaukset tehdään käyttäen Paessler AG:n PRTG Network Monitor -ohjelmaa ja kiertoajan lantenssin mittaukset

PingTester Standard -ohjelmalla. Ohjelmia ajetaan erilliseltä mittausPC:ltä. Simuloidut verkkokuormat tuotetaan Ostinato-ohjelmalla.

PRTG Network Monitor on verkon valvontaohjelmisto, joka hyödyntää mm. SNMPv1-protokollaa kerätäkseen tietoja verkon laitteista. PRTG:n visuaalisen käyttöliittymän perustana ovat ”sensorit”, joilla tarkoitetaan virtuaalisia sensoreita, jotka keräävät verkkolaitteelta dataa esim. kyselemällä SNMP:tä käyttäen laitteen OID-arvoja. Ohjelmalla voi luoda graafeja mittaustilastoista ja tallentaa mittausdataa xml- tai csv-muotoon. (PRTG feature overview 2012.)

PingTester on ilmaisohjelma Autobaubilta. Ohjelmalla voidaan ajaa räätälöityjä kiertoaajan lantessin mittauksia eli pingejä. Mittaukset on mahdollista ajoittaa tietylle aikavälille ja räätälöitäviä parametrejä ovat aikaväli, ICMP-paketin koko, Time Out eli aikakatkaisu ja testipakettien määrä. (Ping Tester 2012.)

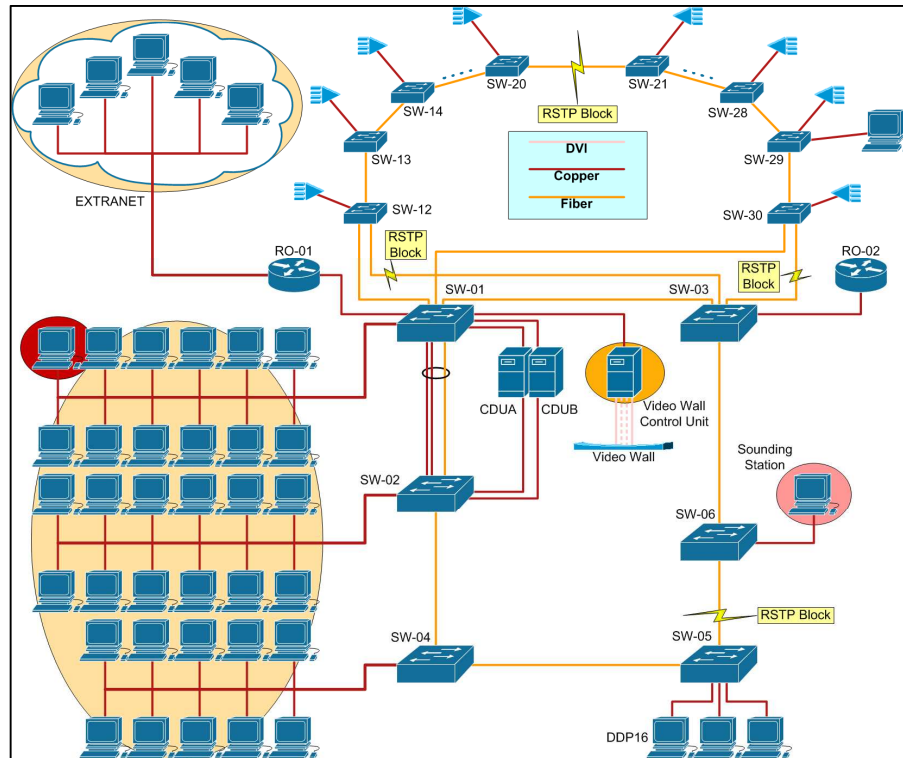
Ostinato on avoimen lähdekoodin pakettigenerointiohjelma, joka toimii palvelin-asiakas periaatteella. Hallintaohjelma asennetaan asiakkaana toimivalle työasemalle ja se ottaa yhteyttä yhteen tai useampaan palvelimena toimivaan työasemaan, joille asennettu drone-ohjelmisto. Palvelimet toimivat pakettigeneroinnin lähteinä. Hallintaohjelmalla kullekin palvelimelle luodaan yksi tai useampi kustomoitavissa oleva pakettivirta. (Ostinato 2012.)

5.2.3 Mittausjärjestelyt

PRTG:llä kerätään data mittauspisteissä 1 - 5. MittausPC kytketään SW-01 kytkimeen. Ohjelma saa tietonsa kyselemällä laitteen SNMP-agentilta OID-arvoja. Verkkoliikenteen määrät saadaan selville kyselemällä MIB-II-standardin mukaista IF-MIB-aliosan ifIndex-arvotaulukon arvoja porteille Gi3, Gi49 ja Gi50 luvun 4.3.5 mukaisesti. Prosessorin ja muistin käyttöasteet saadaan kyselemällä Ciscon oman ciscoProcessMIB-kirjaston cmpCPUTotalindex-taulukon arvoja. Data kerätään csv-tiedostoon.

PingTester:llä tehdään mittaukset pisteissä 6 - 9. Pisteissä 6 - 9 mitataan anturidatan vasteaikaa sarjaliikennemuunnimelta CDUA-palvelimelle ja DDP-työasemalle, joten mittauksissa mittausPC kytketään haaran a. ja b. etäisimpiin kytkimiin esittämään sarjaliikennemuunninta. Pisteessä 9 mitataan vasteaikaa CDUA:n ja etäisimmän työaseman välillä, joten mittausPC kytketään haaran c. etäisimpään kytkimeen esittämään työasemaa. Mittauksia otetaan ensin ilman simulointia ja sitten sen kanssa. Tulokset tallennetaan csv-tiedostoon.

Ostinatolla generoidaan verkkoon videosuoratoisto-toiminnon ja tiedoston siirtojen tuottamat maksimikuormat, jotta voidaan simuloida verkon todellista kuormitustasoa. Kuva 4 korostaa pakettigeneroinnissa osallisena olevat työasemat oranssilla ja punaisella. Vaalemmalla sävyllä korostetut työasemat ovat lähteitä ja tummemman sävyn työasemat kohteita.



Kuva 4. Simuloitujen kuormien lähteet ja kohteet.

Perustuen luvun 4.4.1 järjestelmäkuvaukseen, videosuoratoisto-toiminnon simuloinnissa verkkoon simuloidaan 64 kpl 12 Mbit/s UDP-segmenttivirtaa maksimihyötykuormalla eli 1 518 bitillä. Tämä tuottaa n. 950 p/s per virta. Virtojen lähteeksi asetaan kaikki työasemat, mutta koska lentokenttäasäijärjestelmään kuuluu vain 36 työasemaa, simuloidaan loput puuttuvat virrat kaksinkertaistamalla 28 työaseman kuormat 24 Mbit/s ja noin 1 950 p/s per virta. Virtojen kohteeksi asetetaan Video Wall Control Unit:ia vastaava videosimulointiPC, joka esittää järjestelmäkuvauksessa mainittua näytönohjainyksikköä. VideosimulointiPC liittyy SW-01:n porttiin Gi22.

Tiedostosiirtoa simuloidaan yhdellä UDP-segmenttivirralla, joka syötetään maksimisiirtonopeudella käyttäen lähteenä Sounding Station -työasemaa esittävää siirtosimulointiPC1:stä, joka on kytketty SW-06:n porttiin Gi43. Kohteena toimii siirtosimulointiPC2:ksi nimetty työasema, joka on kytketty SW-01:n porttiin Gi24. Simulointi tuottaa noin 929 Mbit/s jatkuvan kuorman linkille.

Simuloitujen virtojen todellista kuormarastetta seurataan PRTG-ohjelmalla, jotta varmistetaan simulaation oikeellisuus.

5.2.4 Vasteaikojen mittausten parametrit

Pakettikaappausmittauksen tuloksen mukaan suurin UDP-anturidatapaketti on kooltaan 146 tavua, joten vasteaikojen mittauspakettien kooksi valitaan listalta seuraava suurempi koko mikä testiohjelmassa on valittavissa, eli

256 tavua. Näin varmistetaan, että mittaustulos on vertailtavissa kaikkiin mahdollisiin anturidatapaketteihin. Näytteenottoaajuudeksi valitaan edellä mainittu 1 s eli 1 000 ms, jotta saadaan riittävästi mittausnäytteitä.

6 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä luvussa on esitetään mittaustulokset ja niistä tehdyt johtopäätökset. Tulokset on pyritty esittämään mahdollisimman selkeässä muodossa. Dataa kertyi suuria määriä taulukkomuodossa, minkä johdosta sitä on pyritty esittämään ensisijaisesti graafeina.

Vasteajan ja hävikin mittaustulosten analysoinnissa ja formatoinnissa tuli esille, että dataa ei kannata esittää graafisena. Saaduissa tuloksissa oli hyvin vähän vaihtelua ja arvot olivat lähellä nolla millisekuntia, joten tulokset päädyttiin esittämään taulukkomuodossa. Taulukkomuodossa tulokset voidaan myös esittää tiiviimmässä muodossa.

6.1 Pakettikaappaus

Kaappauksen tuloksena saatiin selville, että suurin anturidatapaketin koko voi olla 146 tavua. Näitä paketteja saapui mittausPC:lle vain yksi minuutissa, niin kuin on kuvattu projektin dokumentaatiossa. Keskimääräinen anturidatapaketin koko oli mittaustuloksessa n. 70 tavua ja näitä 70 ± 10 tavun kokoisia paketteja oli mittausdatan paketeista valtaosa.

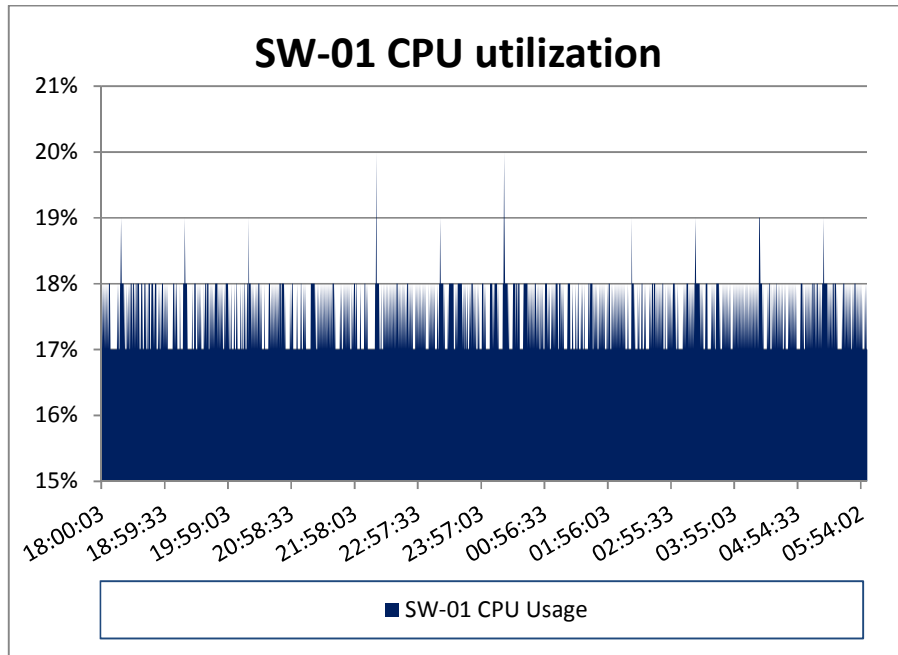
Pakettikaappauksen suodatettu data on listattu liitteessä 2, ja vertaamalla UDP-kohdeportteja taulukon 8 portteihin voidaan todeta, että kaappaus sisältää paketteja jokaiselta lentokenttäsäätöjärjestelmän anturityypiltä. Tämä tarkoittaa, että tulosta voidaan pitää luotettavana ja, että sen perusteella voidaan määrittää tarvittu vasteaikojen mittauspaketin koko.

6.2 Käyttöaste- ja kuormitusmittaukset

Kytkimen portista sisään ja ulos suuntautuvaa kuormaa mitattiin erikseen ja tulokset ovat esitetty yhdessä graafissa. Tämän vuoksi, ja koska tuloksissa esiintyi kohtalainen määrä vaihtelua, graafeihin on lisätty myös kymmenen arvon liukuvan keskiarvon viiva helpottamaan lukemista ja tulkittamista.

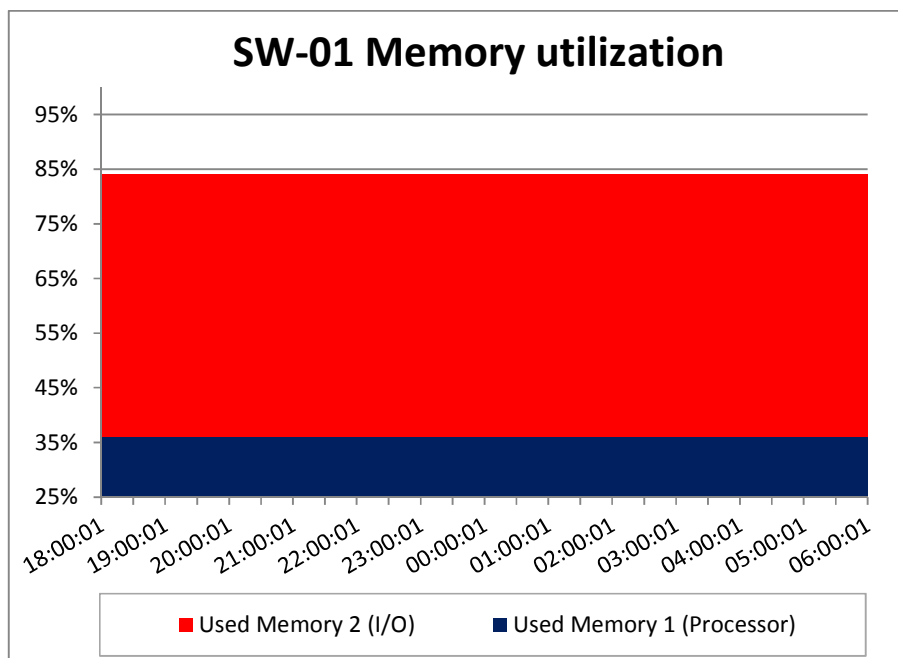
6.2.1 SW-01:n prosessorin ja muistin käyttö

Kuvio 1 esittää SW-01 prosessorin käyttöastetta 12 tunnin ajalta, mitattuna 30 sekunnin välein. Kuten graafista voidaan nähdä, käyttöaste ei juuri vaihtele ja pysyttelee 17-18 %:ssa, joka on reilusti alle luvussa 5 esitetyn raja-arvomääritelmän.



Kuvio 1. SW-01:n prosessorin käyttöaste 12 tunnin aikana.

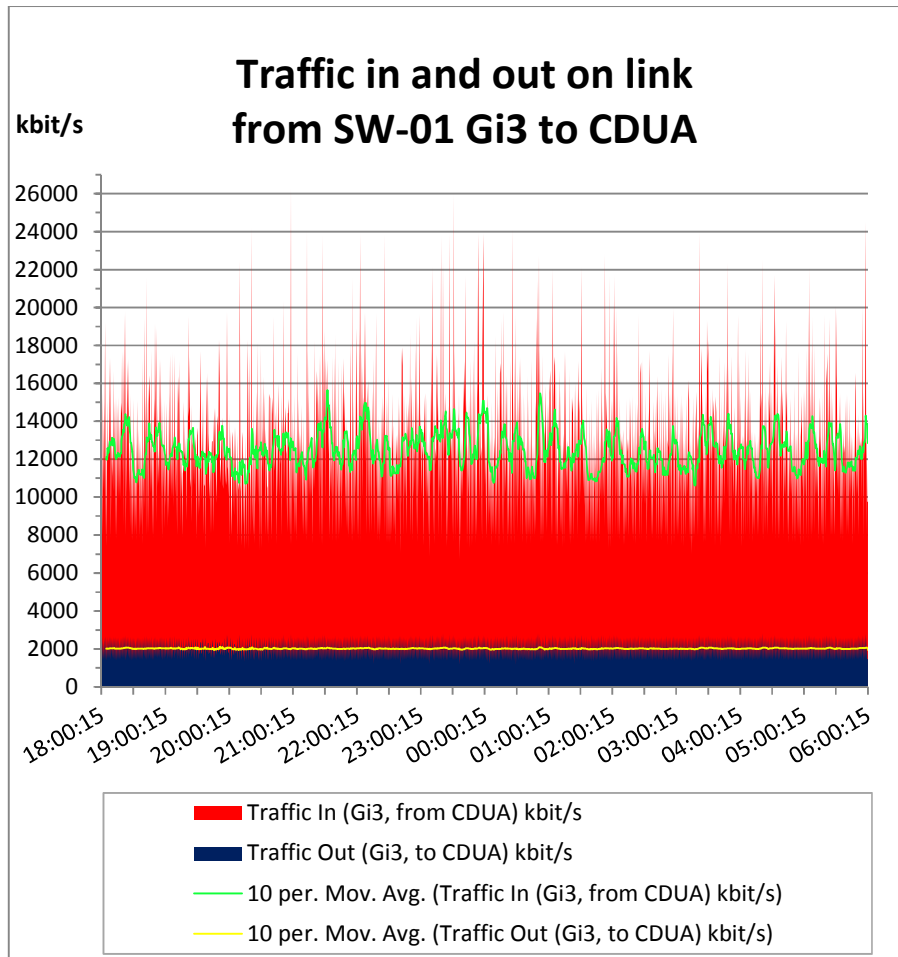
Kuvio 2 näyttää SW-01:n muistin käyttöasteita. Graafissa on esitettyä erikseen I/O-muisti ja prosessorin muisti. Prosessorin muistia on käytössä noin 36 % maksimista ja I/O-muistia n. 83 %. Kuvaajilla ei esiinny lainkaan vaihtelua, joten voidaan päätellä, että 12 tunnin aikana verkossa ei ole tapahtunut lainkaan topologisia muutoksia. Muutokset saavat aikaan kytkimen kytkentätaulukon päivittymistä, joka tuottaa töitä prosessorille ja lisää muistin käyttöä kuten on selostettu luvussa 2.2. 50 % raja-arvo rikotaan I/O-muistin kannalta, mutta muistin prosentuaalinen käyttöaste ei ole suoraan verrannollinen kytkimen kuormaan. Tämän testaamiseksi SW-01 -kytkimen prosessorin ja muistin käyttöasteita mitattiin myös vasteaikamittauksissa käytetyn simulaatiokuormituksen aikana ja tulokset on esitetty liitteen 1 graafeissa. Tuloksista voidaan nähdä, että simulaatioiden tuottamalla suurella kuormalla ei ollut vaikutusta kytkimen prosessorin tai muistien käyttöasteeseen.



Kuvio 2. SW-01:n muistin käyttöasteet 12 tunnin aikana.

6.2.2 SW-01:n linkkien kuormitus

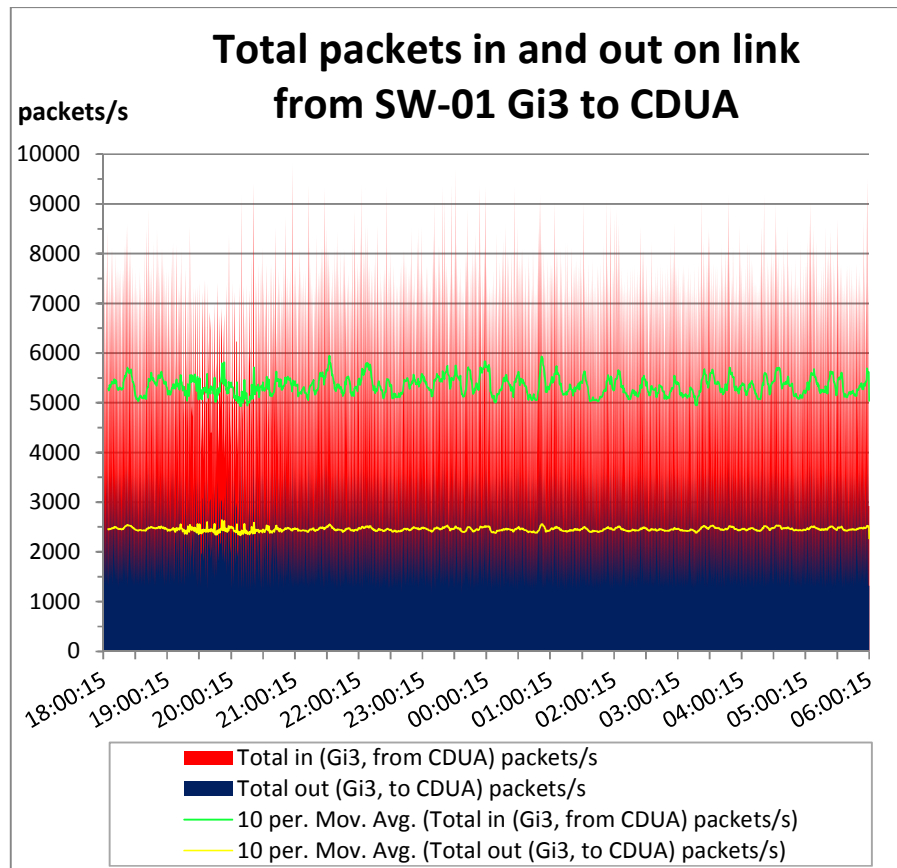
SW-01:n linkki Gi3 CDUA:lle on järjestelmän ruuhkaisin. Sen kautta kulkee CDUA:lle anturidataa, mutta suurimman liikenteen tuottaa CDUA takaisin kohti SW-01-kytkintä. Tämän liikenteen tuottaa lentokenttäasäijärjestelmän normaali toiminta ja se on pääasiassa tiedonjakoa CDUA-palvelimelta järjestelmän työsämille TCP-segmentein. Kuvion 3 esittämät datamäärät ovat hyvin vaihtelevia, mutta jäävät huippuarvoiltaan (26 Mbit/s) kauas maksimikapasiteetista (1 000 Mbit/s).



Kuvio 3. Linkillä SW-01, Gi3 – CDUA sisään ja ulos kulkeva kuorma kilobittia sekunnissa.

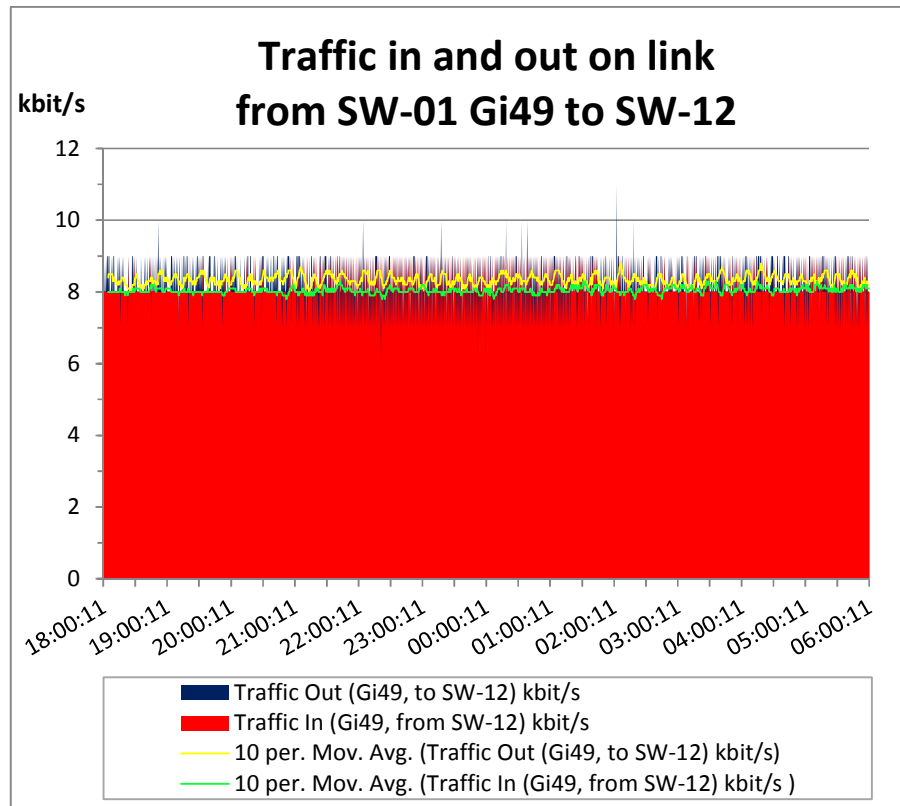
Kuvion 4 esittämässä graafissa nähdään SW-01:n ja CDUA:n välisellä linkillä kulkevia pakettimääriä. Graafista voidaan nähdä, että arvoissa on erityisesti CDUA:lta kytkimen suuntaan suurta vaihtelua. CDUA:n laskennassa algoritmin tuottaessa jonkin johdannaistiedon se julkaistaan ja päivitetään välittömästi kaikille työasemille samaan aikaan. CDUA:n tiedonjako on siis puskemaista ja se on nähtävissä myös graafista.

Kuorman ja pakettimäärän suhteesta saadaan arvio keskimääräisestä pakettikoosta jakamalla ajan hetkellä kuorma pakettimäärällä. Näin saadaan paketin keksimääräiseksi kooksi n. 300 tavua. Laskennallisesti suurin mahdollinen pakettinopeus 1 Gbs linkille on $\frac{\text{kaistanleveys}}{\text{pakettikoko}}$, jolloin 300 tavun paketilla tulokseksi saadaan $\frac{1\,000\,000\,000\text{ bit/s}}{300\text{ B} * 8} \approx 416\,667\text{ p/s}$. Jos raja-arvona pidetään 50 % tästä tuloksesta, niin graafin perusteella pakettiliikenne linkillä jää reilusti alle raja-arvon.



Kuvio 4. Linkillä SW-01, Gi3 – CDUA sisään ja ulos kulkevat paketit sekunnissa.

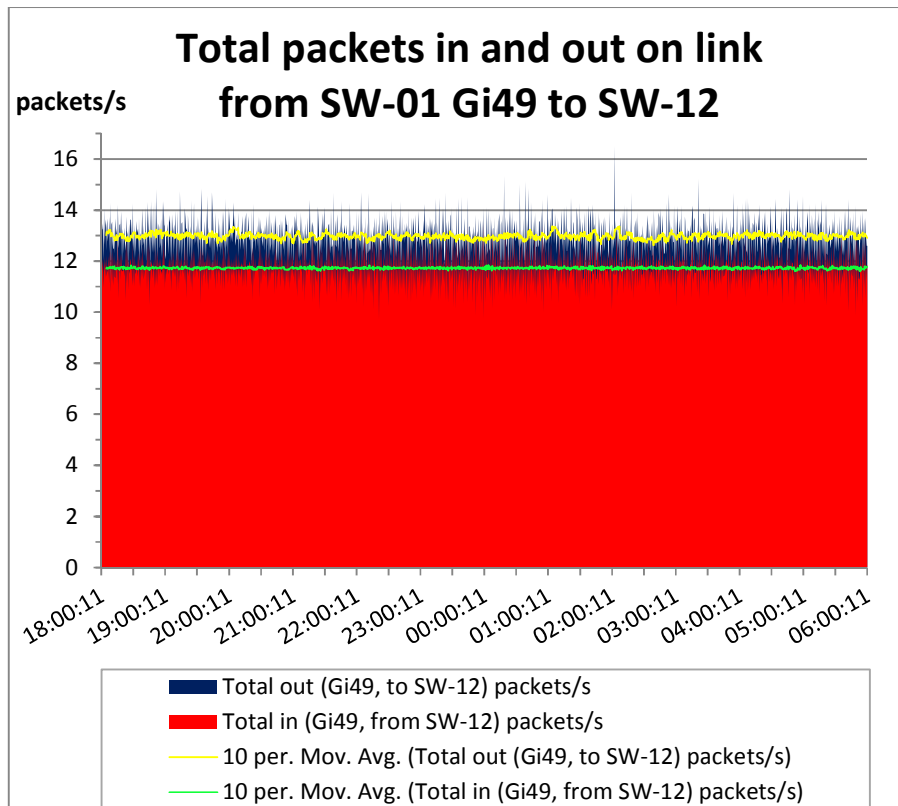
Kuvion 5 esittämästä graafista nähdään SW-01:n portin Gi49 kuormaa. Tämä verkkoliikenne on pääasiassa anturidataa ja voidaan todeta sen olevan hyvin pientä ja tasaista. Linkin 1 Gbs kapasiteetista 8 kbit/s on 0,0008 %.



Kuvio 5. Linkillä SW-01, Gi49 – SW-12 sisään ja ulos kulkeva kuorma kilobitteinä sekunnissa.

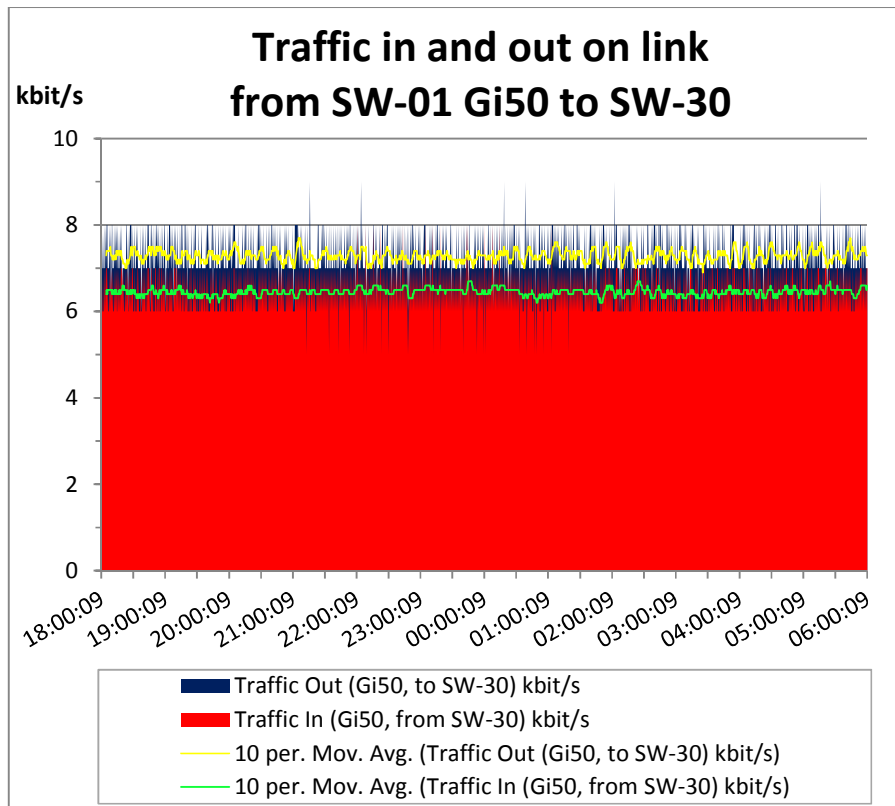
Kuvion 5 graafin mukaan keskimääräinen kuorma linkillä kytkimeltä SW-12 kohti kytkintä SW-01 on n. 8 kbit/s ja kuvion 6 graafin mukaan keskimääräinen pakettinopeus on n. 12 p/s. Edellä mainitun laskukaavan

mukaan näillä arvoilla paketin keskikooksi saadaan $\frac{\left(\frac{8\,000\,bit}{s}\right)}{12\frac{p}{s}} \approx 83$ tavua, mikä on lähellä liitteen 2 mukaista keskimääräistä anturidatapaketin kokoa. Laskennallisesti 83 tavun pakettikoolla on 1 Gbs kaistanlevyisen linkin suurin mahdollinen pakettinopeus edellä mainitun laskukaavan mukaan $\frac{1\,000\,000\,000\,bit/s}{83\,B * 8} \approx 12\,048\,192\,p/s$. Toisin sanoen 1 Gbs linkki anturidatan siirtoon on kapasiteetinsa puolesta reilusti ylimitoitettu.

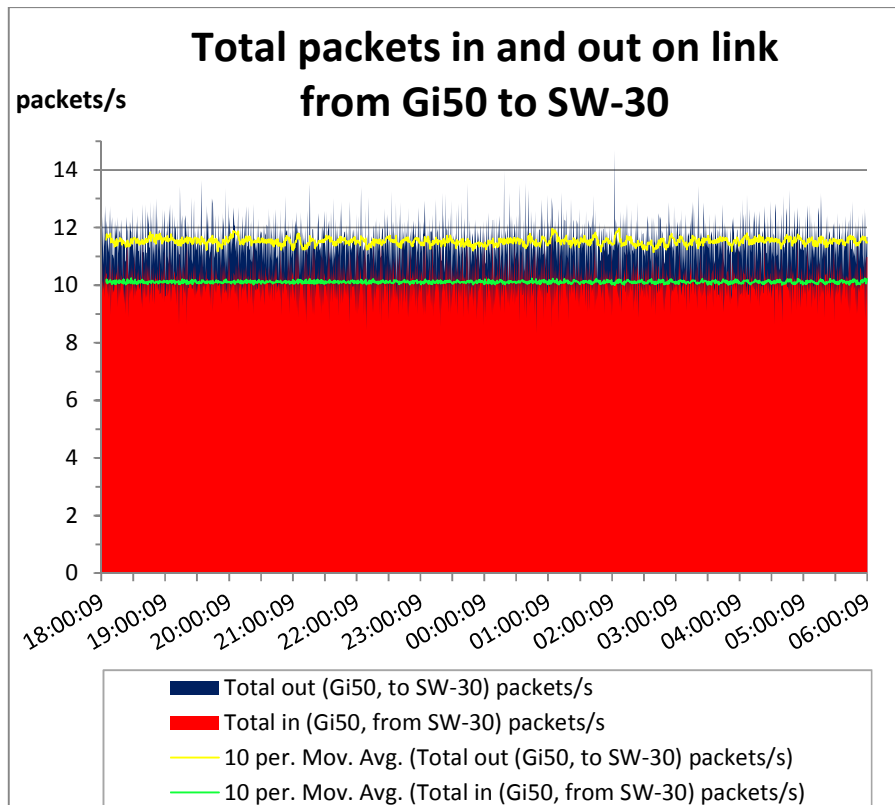


Kuvio 6. Linkillä SW-01, Gi49 – SW-12 sisään ja ulos kulkevat paketit sekunnissa.

Linkillä kytkimeltä SW-01 kytkimelle SW-30 kuormitus ja pakettinopeus ovat kuvioden 7 ja 8 graafien mukaan odotettavasti samalla tasolla kuin linkillä kytkimelle SW-12. Pienet erot voivat selittyä haaran anturien eri määrillä ja tyypeillä, jotka vaikuttavat datapakettien kokoihin ja lähetysväleihin.



Kuvio 7. Linkillä SW-01, Gi – SW-30 sisään ja ulos kulkeva kuorma kilobitteinä sekunnissa.



Kuvio 8. Linkillä SW-01, Gi – SW-30 sisään ja ulos kulkevat paketit sekunnissa.

6.3 Vasteaikojen mittaukset

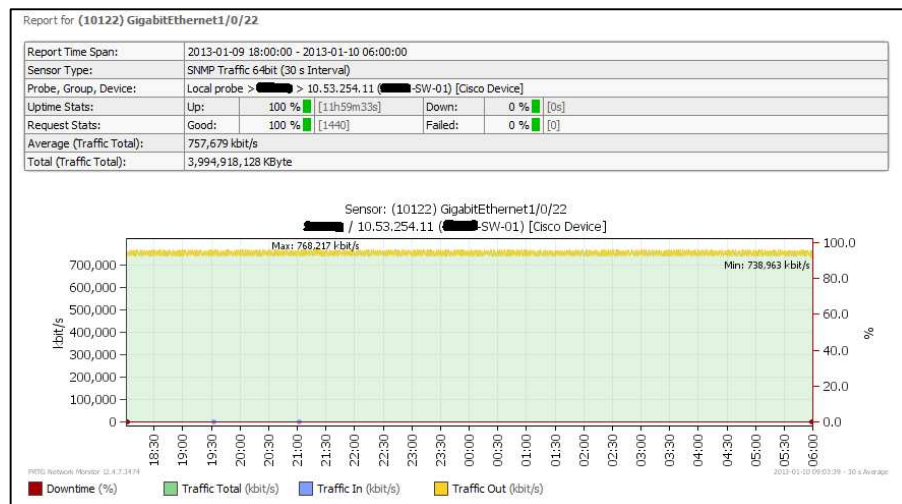
Vasteaikojen mittausten tuloksista kävi ilmi, että kytkimillä toteutetussa Case-verkossa, ajettaessa lentokenttäsjärjestelmää normaaliajossa, vasteajat ovat äärimmäisen pieniä.

Ennalta arvaamattomien teknisten hankaaluksien ja aikataulumuutosten johdosta kaikkia mittauksia ei onnistuttu tekemään. Hankaluksia tuotti PingTester-ohjelmiston huonosti ohjelmoitu käyttöliittymä, jonka vuoksi osa mittauskerroista epäonnistui. Korvaavia mittauskertoja ei enää ehditty toteuttaa, koska Case-verkko ja koko järjestelmä oli aikataulutettu purettavaksi. Dataa jäi puuttumaan mittauspisteestä 6 eli haaran b. kautta kulkevan anturidatan vasteajat.

Mittausdatan menetyksestä ei silti ole merkittävää haittaa tutkimuksen eheydelle. Anturidatan reitti ja solmukohtat mittauspisteessä 6 ovat identtisiä mittauspisteen 5 kanssa paitsi, että sarjaliikennemuunnin TS-11 sijaitsee haaran b. päässä ja muunnin TS-10 haaran a. päässä. Haarat a. ja b. ovat kuitenkin lähes identtisiä jos vertaillaan kytkimien ja linkkien määrää. Kuten voidaan nähdä kuvasta 3, reitillä haarassa b. on vain yksi kytkin ja yksi linkki enemmän kuin reitillä haarassa a. Myös luvun 6.2.2 tuloksista voidaan nähdä, että linkkien kuormitukset ovat hyvin pieniä ja samalla tasolla. Näin ollen voidaan arvioida, että vasteajat mittauspisteessä 6 olisivat lähes samat kuin vasteajat mittauspisteessä 5.

6.3.1 Simuloitu verkkoliikenne

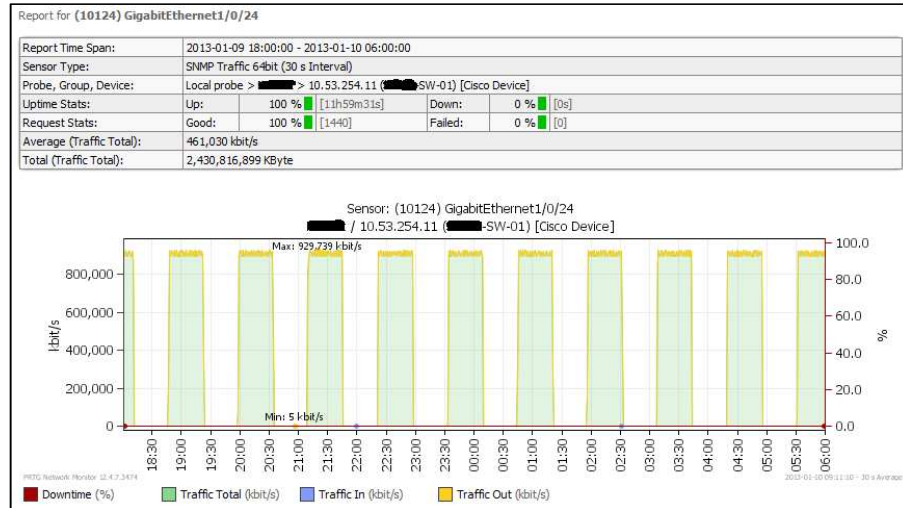
Simuloitua videosuoratoiston tuottamaa verkkokuormaa seurattiin PRTG Monitor -ohjelmalla SW-01:n portissa Gi22. Kuten luvussa 6.2.3 on kuvattu, tähän porttiin on kytketty kaikkien simuloitujen datavirtojen kohde, VideosimulointiPC. Kuvasta 5 voidaan nähdä, että simuloitu UDP-virta portista VideosimulointiPC:lle oli keskimäärin n. 757 Mbit/s, joka on hyvin lähellä simuloinnilta odotettua kokonaiskuormaa.



Kuva 5. Simuloitun videosuoratoiston tuottama todellinen kuorma.

Videosuoratoiston simuloinnista voidaan sanoa sen vastaavan todellista tilannetta riittävästi.

Tiedostosiirron simulaation todellisuus taas osoittautui odotuksista poikkeavaksi. Simulointi toteutettiin generoimalla maksimiverkkokuorma kahden testityöaseman välillä, kuten luvussa 5.2.3 on kuvattu. PRTG Monitorista kaapatun kuvan 6 perusteella voidaan kuitenkin todeta, että todellinen verkkokuorma ei ollut odotusten mukainen.



Kuva 6. Simuloidun tiedostonsiirron tuottama todellinen kuorma.

Tuntemattomasta syystä johtuen tasaiseksi UDP-segmenttivirraksi tarkoitettu simulointi osoittautui ”pätittäiseksi”. SiirtosimulointiPC2:n, eli vastaanottavan työaseman, verkkoadapterille saapui vain n. 40 minuuttia yhtäjaksoista n. 920 Mbit/s segmenttivirtaa, minkä jälkeen virta katkesi täysin n. 30 minuutiksi, kunnes sama sykli alkoi uudestaan. Syy ilmiöön jäi selvittämättä, mutta voidaan spekuloida, olisiko taustalla esim. SiirtosimulointiPC1:n kyvyttömyys tuottaa verkkoon näin suurta jatkuvaa kuormaa ja siitä johtuva työaseman käyttöjärjestelmän epävakaata toimintaa tai väliaikainen jumituminen.

Pätkimisen mahdolliset vaikutukset tulee ottaa huomioon tarkasteltaessa vasteaikamittausten tuloksia. Tämä ei välttämättä ole ongelma, koska pätkiminen näyttää olleen hyvin tasaisen toistuvaa. Vertaamalla mittausnäytteiden aikaleimoja kuvaan 6, mahdolliset vaikutukset voidaan helposti havaita.

6.3.2 Vasteajat ja pakettihävikki.

Taulukot 10 ja 11 listaavat verkon mittauspisteistä mitatut tulokset vasteajoille ja hävikille simuloidun verkkoliikenteen kanssa ja ilman.

Taulukko 10. Vasteaika- ja hävikkimittausten tulokset ilman simulointia.

Mittaus piste	Polku	SRC IP	DST IP	Lähetetty	Vastaan- otettu	Paketti- hävikki	Paketti- hävikkitaso	Latenssi MIN	Latenssi MAX	Latenssi AVG
5	MittausPC (simuloi TS-10) --> CDUA	10.53.22.1	10.53.10.11	43 200	43 196	4	0,009 %	0 ms	30 ms	0 ms
7	MittausPC (simuloi TS-10) --> DDP16	10.53.22.1	10.53.21.16	43 200	43 197	3	0,007 %	1 ms	2 ms	1 ms
8	MittausPC (simuloi TS-11) --> DDP16	10.53.22.1	10.53.21.16	43 200	43 199	1	0,002 %	1 ms	3 ms	1 ms
9	MittausPC (simuloi DDP16) --> CDUA	10.53.22.1	10.53.10.11	43 200	43 200	0	0,000 %	0 ms	9 ms	0 ms

Taulukko 11. Vasteaika- ja hävikkimittausten tulokset simuloinnin kanssa.

Mittaus piste	Polku	SRC IP	DST IP	Lähetetty	Vastaan- otettu	Paketti- hävikki	Paketti- hävikkitaso	Latenssi MIN	Latenssi MAX	Latenssi AVG
5	MittausPC (simuloi TS-10) --> CDUA	10.53.22.1	10.53.10.11	43 200	43 198	2	0,005 %	0 ms	2 ms	0 ms
7	MittausPC (simuloi TS-10) --> DDP16	10.53.22.1	10.53.21.16	43 200	43 198	2	0,005 %	1 ms	3 ms	1 ms
8	MittausPC (simuloi TS-11) --> DDP16	10.53.22.1	10.53.21.16	43 200	43 192	8	0,019 %	1 ms	3 ms	1 ms
9	MittausPC (simuloi DDP16) --> CDUA	10.53.22.1	10.53.10.11	43 200	43 198	2	0,005 %	0 ms	2 ms	0 ms

Kuten taulukoista voidaan nähdä, latenssit kaikilla poluilla olivat mittauksissa häviävän pieniä. Tämä on odotettava tulos kytkimillä toteutetussa Ethernet-lähiverkossa ja luvussa 3.1.6 mainitaankin kytkimien tuottaman latenssin olevan mikrosekunttien luokkaa. Kuvan 6 havainnollistaman pätkimisen vaikutuksia ei tulosten pienen vaihtelun vuoksi voida havaita.

Kaikissa mittauksissa 43 200:sta mittauspaketista alle 10 ei saapunut takaisin mittausPC:lle ja lasketut pakettihävikkitasot osoittautuvat prosentoin tuhannesosiksi. Simuloidulla kuormalla ei ole havaittavissa vaikutusta. Kuten luvussa 3.1.6 on mainittu, ping-työkalulla saatua hävikkitasoa tulee pitää vain viitteellisenä.

7 YHTEENVETO JA LOPPUSANAT

Tulosten perusteella Case-verkko täyttää sille luvussa 1 asetetut odotukset ja suorituskyvyn perusteella lentokenttäjärjestelmää on mahdollista laajentaa 50 %:lla. Verkon Gigabit Ethernet -linkit ovat kapasiteettiinsa puolesta pelkän lentokenttäjärjestelmän käyttöön reilusti ylimitoitettuja ja esim. anturidatan siirtämiseen voitaisiin käyttää pienempikaistanlevyistä (ja mahdollisesti halvempaa) teknologiaa kuten ISDN:ää. Verkon kahdennetuilla kuituyhteyksillä voidaan kuitenkin varmistaa erittäin häiriökestävät tiedonsiirrot, jotka ovat korkean tärkeysjärjestyksen vaatimuksia lentokenttäjärjestelmälle. Toisaalta myös videosuoratoistotoiminnon häiriötön toiminta vaatii Gigabit Ethernet -linkkejä suuren kuormituksensa puolesta.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että verkon linkkien ja laitteiden aiheuttamat latenssit ovat hyvin pieniä eikä järjestelmään kuuluvan videosuoratoisto -toiminnon tuottamalla kuormituksella ole latensseihin havaittavaa vaikutusta. Luvussa 2.2 on selitetty, että kytkimillä toteutetussa full duplex -verkossa jokaisella linkillä voidaan siirtää dataa linkin nimelliskaistanleveydellä suuntaansa. Tämän vuoksi on odotettavaa, että simuloidulla kuormalla voi olla vaikutusta latensseihin vain, jos juuri mittauksen kohteena olevaa linkkiä kuormitetaan. Kuvasta 4 voidaan nähdä, että vasteaikamittausten poluilla simuloitua kuormaa esiintyy kytkimien SW-01, SW-02 ja SW-04 välisillä linkeillä. Kuvan 3 mukaan nämä linkit ovat osana polkuja mittauksissa pisteissä 7-9. Taulukoiden 10 ja 11 tulokset kuitenkin osoittavat, että simuloidulla kuormituksella ei ole havaittavaa vaikutusta latensseihin. Yhtäläillä simuloitu tiedostonsiirto havaittuine pätkimisineen ei vaikuta mittattujen polkujen latensseihin, koska tiedostonsiirto ei käytä samoja linkkejä polkujen kanssa.

Opinnäytetyön edistyi tasaisesti projektin aikataulun mukana ja sisälsi myös pari kuukautta muita toimeksiannon sisältämiä töitä alkaen Case-verkon suunnittelun ja dokumentaation viimeistelystä ja päättyen asiakaskoulutuksiin ja tehdastesteihin. Itse mittauksille aikataulu oli tiukka, koska järjestelmä oli koottuna testialueella vain yhteensä n. 4 viikkoa, jotka sijoittuivat vielä joulupyhien ajalle. Tänä aikana suoritettiin viikon kestävä tehdastesti ja ratkottiin testeissä havaittuja ongelmia. Mm. testeissä havaitun vakavan MAC-flap-ongelman ratkaisuun kului aikaa kokonainen viikko.

MAC-flap-ongelma oli erityisen haastava ratkaista, koska se esiintyi vain tietyssä hankalasti toistettavassa tilanteessa. Sen toistaminen edellytti, että SW-12 ja SW-30-anturiasemien virrat kytkettiin päälle samaan aikaan, mutta ongelma ei silti toistunut joka kerta. Ongelma aiheutti häiriön lähiverkon anturiringin kytkimien spanning-tree-algoritmin suorituksessa, minkä vuoksi verkkoon ilmestyi silmukoita. Silmukoiden johdosta kytkimet ylikuormittuivat ja niiden suorituskyky laski dramaattisesti. Kytkimiin ei enää päässyt käsiksi huoltoyhteydellä, eikä tilannetta voinut korjata muuta kuin katkaisemalla anturirinki. Ringin katkaisukaan ei riittänyt elvyttämään anturiasemien Transition Networks kytkimiä, joille oli vielä suoritettava uudelleenkäynnistys.

MAC-flap-ongelma saatiin lopulta ratkaistua ja syylliseksi paljastui Ciscon ja Transition Networks kytkimien välisten linkkien automaattisen parametrien (mm. speed ja duplex -parametrit) neuvottelun yhteensopimattomuus. Ongelma katosi, kun linkkien parametrit määritettiin staattisesti. Jäljelle jäänyt kaksi viikkoa oli loppujen lopuksi kuitenkin riittävä aika mittauksille, vaikka mittausten aikana vastaan tuli myös muita hankaluuksia mittaohjelmistojen kanssa.

PRTG Monitor osoittautui erittäin kattavaksi, mutta samalla myös hankalaksi käyttää. Dokumentaatiota oli niukasti tarjolla, joten asennus ja käyttö piti opetella yrityksen ja erehdyksen kautta. PRTG Monitorilla suoritettavia mittaustilanteita ehdittiin onneksi harjoittelemaan jo ennen tehdastestejä ja mittaukset saatiin suoritettua lopulta ilman hankaluuksia. Hankaluuksia ja odottamatonta toimintaa esiintyi myös PingTester ja Ostinato-ohjelmien kanssa, kuten luvuissa 6.3 ja 6.3.1. on selostettu.

Opinnäytetyön aikana tuli esille ajatus tilanteesta, että joissain lentokenttäsäätäjärjestelmissä UDP-multicast-tapaisen jakelun sijaan anturiasemat voivat jakaa datan TCP-unicast-jakeluna, ja että tämänlaatuisen jakelutavan tuottama verkkoliikenne voisi olla aiheena jatkotutkimukselle. TCP-unicast-jakelun olennainen ero UDP-multicast-jakeluun on, että UDP-multicast-viestit ns. kuulutetaan koko verkossa kaikille multicast-ryhmän vastaanottajille. Multicast-jakelu tuottaa vähemmän verkkoliikennettä, koska jakelua hallitsevat kytkimet, jotka yksinkertaistettuna sanottuna kopioivat vastaanotetun multicast-viestin jokaiselle kytkimeen kytketylle multicast-ryhmään liittyneelle vastaanottajalle.

TCP-unicast-jakelu vastaavasti tuottaa suuremman verkkoliikenteen, koska unicast -jakelun tapaan anturiasema lähettää oman anturidatapakettin jokaiselle vastaanottajalle, jotka kytkimet normaalin toiminnansa mukaan vain välittävät eteenpäin vastaanottajalle. TCP-unicast -jakelun etu on, että TCP-protokolla sisältää toiminnallisuuden virheen tarkistukselle ja uudelleen lähetykselle, eli voidaan olla varmoja, että jokainen anturidatapaketti saapuu vastaanottajalle. Valitettavasti projektin aikataulun vuoksi järjestelmä purettiin ennen kuin tilannetta ehdittiin tutkia ja testata oikealla laitteistolla.

8 LÄHTEET

Adhikari, A., Denby L., Mallows, C., Meloche, J. & Rao, B. 2003. Measuring Network One-way Transit Time white paper. Avaya Labs Research. Viitattu 6.3.2013. Saatavissa:

<http://pubs.research.avayalabs.com/pdfs/ALR-2003-051-paper.pdf>

Barnes D. & Sakandar, B. 2004. Cisco LAN Switching Fundamentals. Cisco Press. Viitattu 6.3.2013. Saatavissa Safari Books Online -palvelusta: <http://www.safaribooksonline.com>

Catalyst 2960 and 2960-S Switch Software Configuration Guide. 2010. Cisco Systems Inc. Viitattu 24.1.2013. Saatavissa: http://www.cisco.com/en/US/docs/switches/lan/catalyst2960/software/release/12.2_55_se/configuration/guide/2960scg.pdf

Catalyst 2960-S Series Switches with LAN Base Software, Data Sheet. 2011. Cisco Systems Inc. Viitattu 4.2.2013. Saatavissa: http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/switches/ps5718/ps6406/product_data_sheet0900aecd80322c0c.html

Cisco IOS Configuration Fundamentals Configuration Guide, Release 12.2. 2006. Cisco Systems Inc. Viitattu 7.3.2013. Saatavissa: http://www.cisco.com/en/US/docs/ios/12_2/configfun/configuration/guide/fcfbook.pdf

Della Maggiora, P. L., Elliot, C. E., Pavone, R. L., Phelps, K. J. & Thompson, J. M. 2000. Performance and Fault Management. Cisco Press. Viitattu 6.2.2013. Saatavissa Safari Books Online -palvelusta: <http://www.safaribooksonline.com>

Fall, K. R. & Stevens R. W. 2011. TCP/IP Illustrated, Volume 1: The Protocols, Second Edition. Addison-Wesley Professional. Viitattu 27.2.2013. Saatavissa Safari Books Online -palvelusta: <http://www.safaribooksonline.com>

Harrington, J. L. 2007. Ethernet Networking for the Small Office and Professional Home Office. Morgan Kaufmann. Viitattu 6.3.2013. Saatavissa Ebrary-tietokannassa: <http://site.ebrary.com.proxy.hamk.fi:2048/lib/hamk/docDetail.action?docID=10201895>

Liotine, M. 2003. Mission-Critical Network Planning. Artech House. Viitattu 15.2.2013. Saatavissa Ebrary-tietokannassa: <http://site.ebrary.com.proxy.hamk.fi:2048/lib/hamk/docDetail.action?docID=10081910>

Miller, Mark A. 2005. Internet Technologies Handbook: Optimizing the IP Network. Wiley. Viitattu 15.2.2013. Saatavissa Ebrary-tietokannassa: <http://site.ebrary.com.proxy.hamk.fi:2048/lib/hamk/docDetail.action?docID=10114209>

Nassar D. 2000. Network Performance Baselining. Sams. Viitattu 6.3.2013. Saatavissa Safari Books Online -palvelusta:
<http://www.safaribooksonline.com>

Newman, D. Jan 2002. Measure for measure: Making metrics matter. Network World 19 (2). Viitattu 19.2.2013. Saatavissa ABI/INFORM Global (ProQuest) -tietokannassa:
<http://search.proquest.com.proxy.hamk.fi:2048/docview/215968472>

Oppenheimer, P. 2010. Top-Down Network Design, 3rd Edition. Cisco Press. Viitattu 11.2.2013. Saatavissa Safari Books Online -palvelusta:
<http://www.safaribooksonline.com>

Ostinato project info. 2012. Viitattu 10.1.2013.
<http://code.google.com/p/ostinato/>

Ping Tester product info. 2012. AutoBAUB Ltd. Viitattu 20.12.2012.
<http://www.pingtester.net/>

Projektin dokumentti, Factory Acceptance Test OVL-508 (Video Wall). 2012. Vaisala Oyj.

Projektin dokumentti, Network Design. 2012. Vaisala Oyj.

Projektin dokumentti, Network Drawing. 2012. Vaisala Oyj.

Projektin dokumentti, Network Equipment Configurations. 2012. Vaisala Oyj.

Projektin dokumentti, Sounding System Description. 2012. Vaisala Oyj.

Projektin dokumentti, System Description. 2012. Vaisala Oyj.

Projektin dokumentti, System Interface Description. 2012. Vaisala Oyj.

Projektin dokumentti, Video Back Projection Wall Appendix D. 2012. Vaisala Oyj.

Projektin dokumentti, Wind Profiler System Description. 2012. Vaisala Oyj.

PRTG Network Monitor feature overview. 2012. Paessler AG. Viitattu 20.1.2013. <http://www.paessler.com/prtg/features>

Reynders, D. & Wright, E. 2003. Practical TCP/IP and Ethernet Networking for Industry. Newnes. Viitattu 28.2.2013. Saatavissa Ebrary-tietokannassa:
<http://site.ebrary.com.proxy.hamk.fi:2048/lib/hamk/docDetail.action?docID=10169846>

Sanders, C. 2007. Practical Packet Analysis: Using Wireshark to Solve Real-World Network Problems. No Starch Press Inc. Viitattu 6.3.2013. Saatavissa Ebrary-tietokannassa:
<http://site.ebrary.com.proxy.hamk.fi:2048/lib/hamk/docDetail.action?docID=10183331>

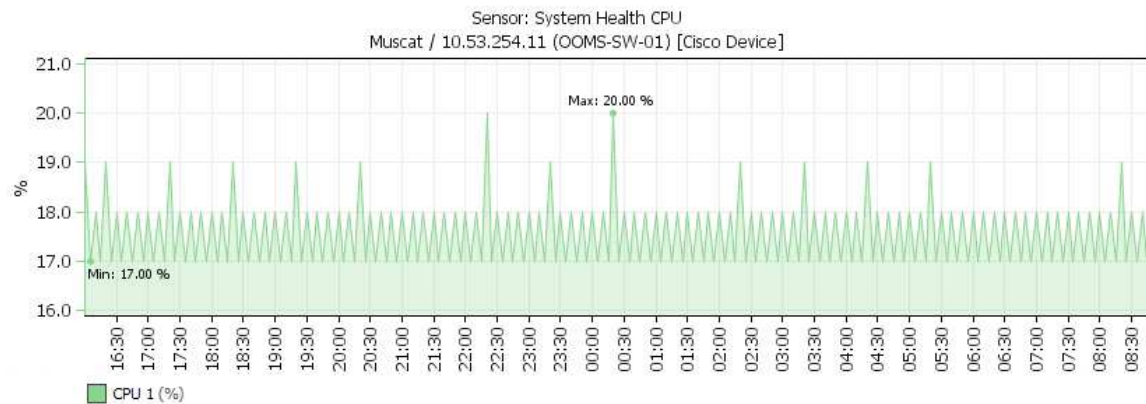
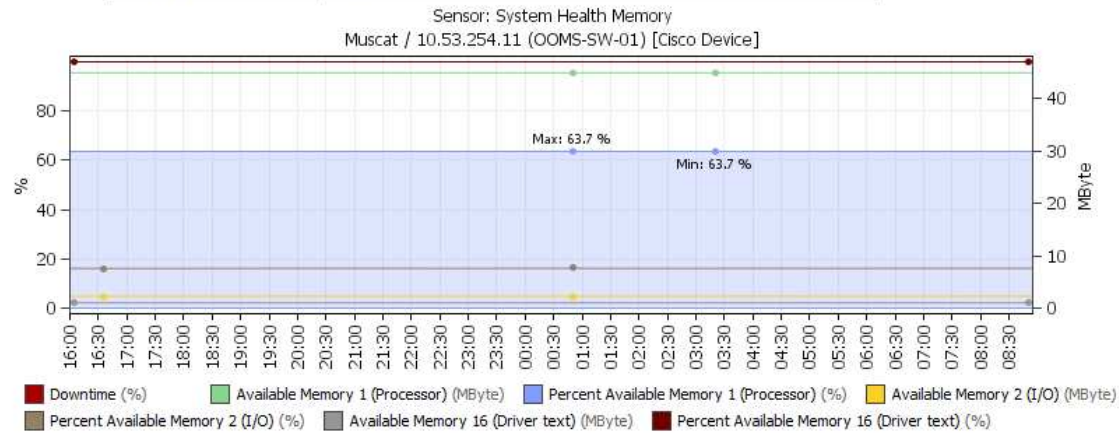
SISGM1040-244-LRT, Data Sheet. 2012. Transition Networks Inc. Viitattu 4.2.2013. Saatavissa:
<http://www.transition.com/TransitionNetworks/Uploads/Downloads/SISGM1040-244-LRT.pdf>

Vaisala Avimet® AWOS-lentosääjärjestelmä. 2012. Vaisala Oyj. Viitattu 10.1.2013
<http://www.vaisala.fi/fi/airports/largeaircarrier/icaoawos/Pages/default.aspx>

Wireshark wiki, CaptureSetup/Ethernet. 2012. Wireshark Foundation. Viitattu 24.1.2013. <http://wiki.wireshark.org/CaptureSetup/Ethernet>

PROSESSORIN JA MUISTIN KUORMITUS SIMULOINNIN AIKANA

Report Time Span:	2013-01-09 16:00:00 - 2013-01-10 09:00:00
Sensor Type:	SNMP Traffic 64bit



PAKETTIKAAPPAUKSEN SUODATETUT TULOKSET

No.	Time	Destination	Protocol	Length	Destination UDP port
1	0	239.53.10.20	UDP	67	12106
2	0.23349	239.53.10.18	UDP	66	12107
3	0.388073	239.53.10.14	UDP	67	12108
4	0.988303	239.53.10.20	UDP	94	12106
5	1.215996	239.53.10.18	UDP	78	12107
6	1.388176	239.53.10.14	UDP	67	12108
7	1.998986	239.53.10.20	UDP	66	12106
8	2.233413	239.53.10.18	UDP	66	12107
9	2.34135	239.53.10.14	UDP	70	12108
10	3.000074	239.53.10.20	UDP	67	12106
11	3.23449	239.53.10.18	UDP	67	12107
12	3.387844	239.53.10.14	UDP	67	12108
13	4.226806	239.53.10.18	UDP	98	12107
14	4.388007	239.53.10.14	UDP	67	12108
15	5.000059	239.53.10.20	UDP	67	12106
16	5.234561	239.53.10.18	UDP	67	12107
17	6.000019	239.53.10.20	UDP	67	12106
18	6.232211	239.53.10.18	UDP	65	12107
19	6.387807	239.53.10.14	UDP	67	12108
20	6.952121	239.53.10.20	UDP	69	12106
21	7.179109	239.53.10.18	UDP	62	12107
22	7.385764	239.53.10.14	UDP	65	12108
23	7.998984	239.53.10.20	UDP	66	12106
24	8.234316	239.53.10.18	UDP	67	12107
25	8.700847	239.53.10.17	UDP	60	12104
26	8.860919	239.53.10.17	UDP	78	12104
27	9.009953	239.53.10.20	UDP	67	12106
28	9.04325	239.53.10.13	UDP	60	12105
29	9.203218	239.53.10.13	UDP	78	12105
30	9.234266	239.53.10.18	UDP	67	12107
31	9.387621	239.53.10.14	UDP	67	12108
32	9.971473	239.53.10.20	UDP	78	12106
33	10.03477	239.53.10.19	UDP	60	12103
34	10.19474	239.53.10.19	UDP	78	12103
35	10.38655	239.53.10.14	UDP	66	12108
36	10.99814	239.53.10.12	UDP	97	12102
37	10.99891	239.53.10.20	UDP	66	12106
38	11.23327	239.53.10.18	UDP	66	12107
39	11.34497	239.53.10.14	UDP	74	12108
40	11.99877	239.53.10.20	UDP	66	12106
41	12.23311	239.53.10.18	UDP	66	12107
42	12.39767	239.53.10.14	UDP	67	12108
43	13.18739	239.53.10.18	UDP	70	12107
44	13.38651	239.53.10.14	UDP	66	12108
45	13.99968	239.53.10.20	UDP	67	12106
46	14.24304	239.53.10.18	UDP	66	12107
47	14.37605	239.53.10.14	UDP	94	12108

LENTOKENTTÄSÄÄJÄRJESTELMÄN LÄHIVERKON SUORITUSKYKY

48	14.99961	239.53.10.20	UDP	67	12106
49	15.233	239.53.10.18	UDP	66	12107
50	15.38744	239.53.10.14	UDP	67	12108
51	15.99128	239.53.10.20	UDP	78	12106
52	16.38746	239.53.10.14	UDP	67	12108
53	17.00848	239.53.10.20	UDP	66	12106
54	17.23403	239.53.10.18	UDP	67	12107
55	18.00964	239.53.10.20	UDP	67	12106
56	18.23398	239.53.10.18	UDP	67	12107
57	18.38732	239.53.10.14	UDP	67	12108
58	18.9821	239.53.10.20	UDP	98	12106
59	19.38728	239.53.10.14	UDP	67	12108
60	19.99958	239.53.10.20	UDP	67	12106
61	20.23289	239.53.10.18	UDP	66	12107
62	20.32933	239.53.10.14	UDP	69	12108
63	20.99968	239.53.10.20	UDP	67	12106
64	21.2328	239.53.10.18	UDP	66	12107
65	21.38726	239.53.10.14	UDP	67	12108
66	21.94432	239.53.10.20	UDP	62	12106
67	22.39726	239.53.10.14	UDP	67	12108
68	22.99926	239.53.10.20	UDP	67	12106
69	23.2327	239.53.10.18	UDP	66	12107
70	23.35855	239.53.10.14	UDP	78	12108
71	23.70063	239.53.10.17	UDP	60	12104
72	23.86038	239.53.10.17	UDP	78	12104
73	23.99937	239.53.10.20	UDP	67	12106
74	24.04268	239.53.10.13	UDP	60	12105
75	24.2027	239.53.10.13	UDP	78	12105
76	24.38701	239.53.10.14	UDP	67	12108
77	24.89373	239.53.10.18	UDP	67	12107
78	25.03417	239.53.10.19	UDP	60	12103
79	25.19438	239.53.10.19	UDP	78	12103
80	25.38592	239.53.10.14	UDP	66	12108
81	25.99743	239.53.10.12	UDP	97	12102
82	25.99837	239.53.10.20	UDP	66	12106
83	26.23364	239.53.10.18	UDP	67	12107
84	26.9993	239.53.10.20	UDP	67	12106
85	27.23364	239.53.10.18	UDP	67	12107
86	27.38701	239.53.10.14	UDP	67	12108
87	27.95042	239.53.10.20	UDP	68	12106
88	28.38679	239.53.10.14	UDP	67	12108
89	29.0093	239.53.10.20	UDP	67	12106
90	29.23247	239.53.10.18	UDP	66	12107
91	29.37846	239.53.10.14	UDP	78	12108
92	29.99811	239.53.10.20	UDP	66	12106
93	30.23246	239.53.10.18	UDP	66	12107
94	30.38682	239.53.10.14	UDP	67	12108
95	31.29133	239.53.10.18	UDP	146	12107
96	31.29781	239.53.10.18	UDP	60	12107
97	31.38677	239.53.10.14	UDP	67	12108
98	31.99917	239.53.10.20	UDP	67	12106
99	32.23247	239.53.10.18	UDP	66	12107
100	32.36918	239.53.10.14	UDP	98	12108

LENTOKENTTÄSÄÄJÄRJESTELMÄN LÄHIVERKON SUORITUSKYKY

101	32.99906	239.53.10.20	UDP	67	12106
102	33.23244	239.53.10.18	UDP	66	12107
103	33.38662	239.53.10.14	UDP	67	12108
104	34.18669	239.53.10.18	UDP	70	12107
105	34.38576	239.53.10.14	UDP	66	12108
106	34.99897	239.53.10.20	UDP	67	12106
107	35.23337	239.53.10.18	UDP	67	12107
108	35.3214	239.53.10.14	UDP	62	12108
109	35.99898	239.53.10.20	UDP	67	12106
110	36.23344	239.53.10.18	UDP	67	12107
111	36.38648	239.53.10.14	UDP	67	12108
112	37.38661	239.53.10.14	UDP	67	12108
113	37.99804	239.53.10.20	UDP	66	12106
114	38.23221	239.53.10.18	UDP	66	12107
115	38.70008	239.53.10.17	UDP	60	12104
116	38.86011	239.53.10.17	UDP	78	12104
117	39.04213	239.53.10.13	UDP	60	12105
118	39.20221	239.53.10.13	UDP	78	12105
119	39.23322	239.53.10.18	UDP	67	12107
120	39.38432	239.53.10.14	UDP	65	12108
121	40.03382	239.53.10.19	UDP	60	12103
122	40.1938	239.53.10.19	UDP	78	12103
123	40.22874	239.53.10.20	UDP	67	12106
124	40.38636	239.53.10.14	UDP	67	12108
125	40.99598	239.53.10.12	UDP	97	12102
126	40.99896	239.53.10.20	UDP	67	12106
127	41.23309	239.53.10.18	UDP	67	12107
128	41.32948	239.53.10.14	UDP	70	12108
129	41.99875	239.53.10.20	UDP	67	12106
130	42.23305	239.53.10.18	UDP	67	12107
131	42.39633	239.53.10.14	UDP	67	12108
132	43.20045	239.53.10.18	UDP	74	12107
133	43.38626	239.53.10.14	UDP	67	12108
134	43.99759	239.53.10.20	UDP	66	12106
135	44.24323	239.53.10.18	UDP	67	12107
136	44.99872	239.53.10.20	UDP	67	12106
137	45.23298	239.53.10.18	UDP	67	12107
138	45.3863	239.53.10.14	UDP	67	12108
139	46.04646	239.53.10.20	UDP	146	12106
140	46.053	239.53.10.20	UDP	60	12106
141	46.22121	239.53.10.18	UDP	94	12107
142	46.38627	239.53.10.14	UDP	67	12108
143	46.99883	239.53.10.20	UDP	67	12106
144	47.23293	239.53.10.18	UDP	67	12107
145	47.99855	239.53.10.20	UDP	67	12106
146	48.23284	239.53.10.18	UDP	67	12107
147	48.38611	239.53.10.14	UDP	67	12108
148	48.9498	239.53.10.20	UDP	68	12106
149	49.386	239.53.10.14	UDP	67	12108
150	49.99854	239.53.10.20	UDP	67	12106
151	50.24292	239.53.10.18	UDP	67	12107
152	50.99875	239.53.10.20	UDP	67	12106
153	51.23064	239.53.10.18	UDP	65	12107

LENTOKENTTÄSÄÄJÄRJESTELMÄN LÄHIVERKON SUORITUSKYKY

154	51.38605	239.53.10.14	UDP	67	12108
155	52.18494	239.53.10.18	UDP	69	12107
156	52.99848	239.53.10.20	UDP	67	12106
157	53.10487	239.53.10.14	UDP	66	12108
158	53.23267	239.53.10.18	UDP	67	12107
159	53.69971	239.53.10.17	UDP	60	12104
160	53.85976	239.53.10.17	UDP	78	12104
161	53.99854	239.53.10.20	UDP	67	12106
162	54.04175	239.53.10.13	UDP	60	12105
163	54.20169	239.53.10.13	UDP	78	12105
164	54.24277	239.53.10.18	UDP	67	12107
165	54.38593	239.53.10.14	UDP	67	12108
166	55.03343	239.53.10.19	UDP	60	12103
167	55.1934	239.53.10.19	UDP	78	12103
168	55.20411	239.53.10.18	UDP	78	12107
169	55.38592	239.53.10.14	UDP	67	12108
170	55.99491	239.53.10.12	UDP	97	12102
171	55.99849	239.53.10.20	UDP	67	12106
172	56.23273	239.53.10.18	UDP	67	12107
173	56.9984	239.53.10.20	UDP	67	12106
174	57.23265	239.53.10.18	UDP	67	12107
175	57.38463	239.53.10.14	UDP	66	12108
176	57.95582	239.53.10.20	UDP	74	12106
177	58.38574	239.53.10.14	UDP	67	12108
178	59.00719	239.53.10.20	UDP	66	12106
179	59.23256	239.53.10.18	UDP	67	12107
180	59.45308	239.53.10.14	UDP	146	12108
181	59.45999	239.53.10.14	UDP	60	12108
182	59.99827	239.53.10.20	UDP	67	12106
183	60.23251	239.53.10.18	UDP	67	12107
184	60.38564	239.53.10.14	UDP	67	12108
185	60.98649	239.53.10.20	UDP	94	12106
186	61.22403	239.53.10.18	UDP	78	12107
187	61.38367	239.53.10.14	UDP	65	12108
188	61.99715	239.53.10.20	UDP	66	12106
189	62.2324	239.53.10.18	UDP	67	12107
190	62.33865	239.53.10.14	UDP	70	12108
191	62.99824	239.53.10.20	UDP	67	12106
192	63.2325	239.53.10.18	UDP	67	12107
193	63.38551	239.53.10.14	UDP	67	12108
194	64.2247	239.53.10.18	UDP	98	12107
195	64.38452	239.53.10.14	UDP	66	12108
196	64.99704	239.53.10.20	UDP	66	12106
197	65.24232	239.53.10.18	UDP	67	12107
198	65.99797	239.53.10.20	UDP	67	12106
199	66.23126	239.53.10.18	UDP	66	12107
200	66.38549	239.53.10.14	UDP	67	12108
201	66.95029	239.53.10.20	UDP	69	12106
202	67.17706	239.53.10.18	UDP	62	12107
203	67.38527	239.53.10.14	UDP	67	12108
204	67.99699	239.53.10.20	UDP	66	12106
205	68.69935	239.53.10.17	UDP	60	12104
206	68.85942	239.53.10.17	UDP	78	12104

LENTOKENTTÄSÄÄJÄRJESTELMÄN LÄHIVERKON SUORITUSKYKY

207	69.00812	239.53.10.20	UDP	67	12106
208	69.04108	239.53.10.13	UDP	60	12105
Average				70.22596	
Min				60	
Max				146	