

Opinnäytetyö (AMK)

Elektroniikka

Tietoliikennejärjestelmät

2012

Matias Hansson

SATELLIITILAAJAKAISTA: LINKIN ANALYYSI, LINKKILASKELMAT JA VERIFIOINTIMITTAUKSET



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Elektroniikka | Tietoliikennejärjestelmät

2012 | 57

Ohjaajat: TKL Juha Nikkanen, Insinööri (AMK) Antti Vihavainen

Matias Hansson

SATELLIITILAAJAKAISTA: LINKIN ANALYYSI, LINKKILASKELMAT JA VERIFIOINTIMITTAUKSET

Satelliittilaajakaistan toimivuuteen vaikuttavat laitteiston lisäksi myös sääilmiöt ja ilmakehässä tapahtuvat muutokset. Tehokkaan tukijärjestelmän suunnittelussa on tärkeää ymmärtää näiden vaikutukset linkkibudjettiin.

Lähdemateriaali kerättiin tutustumalla alan kirjallisuuteen ja lukemalla aikaisempia töitä aiheesta. Teoriaosuudessa tutkitaan vahvistusten, vaimennusten ja interferenssien vaikutuksia linkin toimivuuteen.

Empiirisessä osuudessa mitattiin spektrianalysointilaitteilla satelliittilaajakaistan signaalivahvuutta eri vaimennustiloissa, minkä avulla todettiin modeemin ilmoittaman SNR-arvon olevan luotettava vianhallinnassa. Empiirisessä osuudessa todettiin myös, että vaimennukset eivät aiheuta huomattavaa heikkenemistä satelliittilaajakaistan käytettävyydessä.

Työssä verrattiin teoreettisia arvoja mitattuihin arvoihin ja todettiin, että ne ovat yhdenmukaisia.

Opinnäytetyön lopussa päätellään miten vianhallinnassa voitaisiin käyttää saatuja tuloksia hyödyksi. Lopputuloksena todetaan, että käyttäjämäärän kasvun myötä satelliittilaajakaistan toimivuus saattaa tulevaisuudessa muuttua, jolloin on entistä tärkeämpää, että asiakkaan laitteet ovat oikein asennettuna ja ovat moitteettomassa kunnossa. Tämä opinnäytetyö on hyödyllinen toimeksiantajalle ja tietoliikennejärjestelmien opiskelijoille.

ASIASANAT:

laajakaista, satelliittilaajakaista

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Electronics | Telecommunication Systems

2012 | 57

Juha Nikkanen, Lic.Tech., Principal Lecturer, Antti Vihavainen, BEng, Technical Product Manger

Matias Hansson

SATELLITE BROADBAND: LINK ANALYZATION, LINK CALCULATION AND VERIFICATION MEASUREMENT

Satellite broadband functionality is affected by the equipment and also by the atmosphere. It is important to understand their impact on the link budget in order to have an effective support system.

The research method used was to get familiar with the literature on the subject and other theses written on this subject. In the theory portion different attenuations, amplifications and interferences affecting the link budget were examined.

In the empirical part the power of the satellite signal was measured with a spectrum analyzer in different attenuation conditions. These values were then compared to the corresponding information provided by the modem. The impact that attenuation has on the functionality of the broadband was also examined.

The measured values were compared to the calculated values, and conclusions were made on the reliability of these.

In the last section of the thesis the possible usages of the results were reflected upon. The future challenges with the broadband, resulting from the increased number of users, were also considered. This thesis is useful for the client and for telecommunication systems students.

KEYWORDS:

broadband, satellite broadband

ALKULAUSE

Tämä insinööriyö on tehty TeliaSonera Oy:lle.

Haluan kiittää insinöörejä Antti Vihavaista ja Pentti Salosta mahdollisuudesta tehdä mielenkiintoinen opinnäytetyö. Kiitän myös Turun ammattikorkeakoulun radiolaboratorion henkilökuntaa sekä ohjaajaa Juha Nikkasta.

14.05.2012

Matias Hansson

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET

1 JOHDANTO	1
2 SATELLIITTILAAJAKAISTA	2
2.1 Jakelutekniikka	2
2.2 Referenssiterminaali	3
3 LINKKIBUDJETTI	5
3.1 C/N_{Uplink}	6
3.2 C/N_{Downlink}	9
3.3 C/I_{IMD}	11
3.4 C/I_{XPD}	12
3.5 C/I_{Uplink}	13
3.6 C/I_{Downlink}	14
3.7 Linkkibudjetin osien yhdistäminen	15
4 ILMAKEHÄN VAIKUTUKSET	16
4.1 Ilmakehän kaasujen vaikutukset	16
4.2 Pilvi- ja sumuvaimennus	20
4.3 Troposfääriskintillaatio	21
4.4 Sateen vaikutukset	23
4.5 Vaimennustekijöiden yhdistäminen	25
5 MITTALAITTEISTO	27
5.1 Mittalaitteisto	27
5.2 Tulosten kirjaaminen	29
5.3 Mittausaika ja -olosuhteet	29
6 MITTAUKSET	30
6.1 Kohinapohja	30
6.2 C/N	33
6.3 C/N :n ja SNR :n vastaavuus	35
6.4 Check Portal ja nopeustestit	36

7 TULOKSET JA NIIDEN VERTAAMINEN LINKKIBUDJETTILASKUIHIN	39
7.1 Kirkkaankelin C/N	39
7.1.1 Downlink	40
7.1.2 Uplink	42
7.2 C/N sadevaimennuksen aikana	46
7.2.1 Downlink	47
7.2.2 Uplink	50
7.3 Vaikutukset linkkibudjettiin	52
8 TUKIJÄRJESTELMÄ	54
9 YHTEENVETO	55
LÄHTEET	56

LIITTEET

- Liite 1. Vuosittainen sadekorkeus
- Liite 2. Keskimääräinen sadeintensiteetti
- Liite 3. Vakiot sadevaimennuksen laskemiseen

KUVAT

Kuva 1. Spotit.	3
Kuva 2. Tooway-antenni ja mikropää.	4
Kuva 3. Linkkiparametrit.	5
Kuva 4. KA-SAT transponderikaavio.	11
Kuva 5. Viasat VA-91-KA 9,1 m -maa-aseman säteilykuvio 29,57 GHz:llä.	14
Kuva 6. Mittalaitteiston kytkennät.	27
Kuva 7. Spektrikuva downlink-välitaajuudella.	28
Kuva 8. Spektrianalysoitsijan kohinatasa C/N-mittauksen asetuksilla.	30
Kuva 9. Spektrianalysoitsijan kohinatasa 320 MHz:n SPANilla.	31
Kuva 10. Systeemikohina C/N-mittauksen parametreilla.	32
Kuva 11. Systeemikohina transponderimittauksen asetuksilla.	32
Kuva 12. Kohinatason mittauspisteet.	34
Kuva 13. Lähete ja kohinatasa 320 MHz SPANilla.	34
Kuva 14. Check portal.	37
Kuva 15. Latausnopeus SNR-luvun funktiona.	37
Kuva 16. Lähetyksen nopeus SNR-luvun funktiona.	38
Kuva 17. Keskimääräinen vuosittainen sadekorkeus 0° C.	58
Kuva 18. Keskimääräinen vuosittainen sadeintensiteetti 0,01 % ajasta.	59

KUVIOT

Kuvio 1. Ilmakehän kaasujen aiheuttama ominaisvaimennus standardi-ilmakehässä.	17
Kuvio 2. C/N (dB) ja SNR (dB) ajan funktiona (hh:mm:ss).	35
Kuvio 3. C+N/N (dB) ja SNR (dB) ajan funktiona (hh:mm:ss).	36

TAULUKOT

Taulukko 1. Spottien tiedot.	3
Taulukko 2. C/N_U .	8
Taulukko 3. C/N_D .	11
Taulukko 4. Intermodulaatiosäröt.	12
Taulukko 5. Ylä- ja alarajamarginaalit linkkibudjetille.	15
Taulukko 6. Kaasujen vaimennus eri elevaatioilla.	19
Taulukko 7. Pilvivaimennus eri elevaatioilla.	21
Taulukko 8. Skintillaation vaikutus eri elevaatioilla.	23
Taulukko 9. Sadevaimennukset.	24
Taulukko 10. Kokonaisvaimennukset eri elevaatioilla.	26
Taulukko 11. Kirkkaankelin C/N- ja SNR-arvot.	52
Taulukko 12. Sadekelin C/N- ja SNR-arvot eri aikaproseenteilla.	53
Taulukko 13. Asiakasterminaalin ja satelliitin väliset kirkkaankelin C/N- ja SNR-arvot.	53
Taulukko 14. Asiakasterminaalin ja satelliitin väliset sadekelin C/N- ja SNR-arvot eri aikaproseenteilla.	53
Taulukko 15. Vakiot sadevaimennukset laskemiseksi.	60

KÄYTETYT LYHENTEET

ACM	Signaali/kohinasuhteen mukaan muuttuva modulointi ja koodaus (Adaptive coding and modulation)
C/I	lähetteen ja interferenssien erotus desibeleinä (Carrier to Interference)
C/N	lähetteen ja kohinatason erotus desibeleinä (Carrier to Noise)
EIRP	lähetytstehon ja lähetyssantennin vahvistuksen yhteistulos (equivalent isotropically radiated power)
ITU	International Telecommunication Union
OSS	Skylogicin tukijärjestelmä (Operations Support System)
TRIA	Antennin osa, joka sisältää lähettämiseen ja vastaanottoon tarvittavan elektroniikan ja mikropään (transmit and receive integrated assembly)
VSAT	Kaksisuuntainen asiakasterminalissa käytettävä antenni (Very Small Aperture Terminal).

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, mitä informaatiota vianhallinnan tukijärjestelmässä tulisi olla käytössä ja miten sitä voidaan hyödyntää vian selvityksessä.

Mittausten avulla pyritään selvittämään, miten tarkkoja modeemin ja OSS-järjestelmän ilmoittamat SNR-arvot ovat, ja voidaanko niitä luotettavasti käyttää vianhallinnan tukijärjestelmässä.

Linkkibudjettilaskuilla pyritään teoreettisesti arvioimaan signaalivahvuuksia eri elevaatioilla, sääolosuhteissa ja interferenssitiloissa, jolloin vianhallinnassa olisi tukena myös teoreettisia marginaaleja. Lopuksi pohditaan, miten nämä informaatiolähteet yhdistettäisiin helppokäyttöiseen käyttöliittymään.

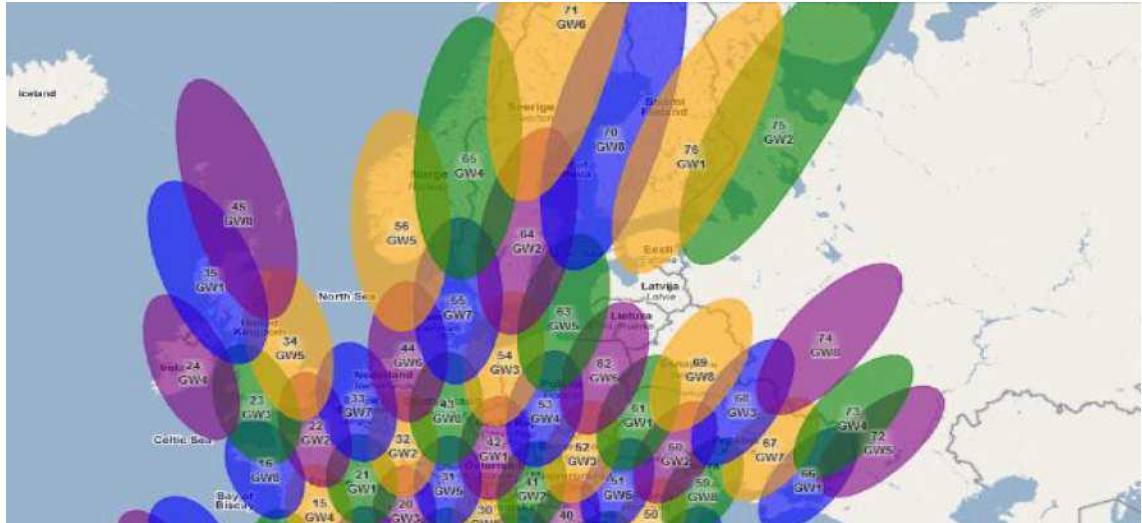
Ilmakehän vaikutuksia satelliitin ja maa-aseman välisessä tiedonsiirrossa on tutkittu runsaasti. Yksi aiheeseen liittyvä opinnäytetyö on norjalaisen yliopistopiskelijan Martin Rytírin kirjoittama ”Radiowave Propagation at Ka-band (20/30 GHz) for Satellite Communication in High-Latitude Regions” [1]. Työssä on tutkittu ilmakehän ja sääilmiöiden vaikutuksia signaalin vahvuuteen. Työssä käytetyt laskukaavat ovat osittain samoja ITU-R:n suosituksia, jotka ovat myös tässä työssä käytössä.

2 SATELLIITILAAJAKAISTA

Satelliittilaajakaista toimii samalla periaatteella kuin mikä tahansa kiinteä laajakaista. Asiakasterminaali lähettää pyynnön operaattorille, joka reitittää pyynnön haluttuun IP-osoitteeseen. Kupari- tai kuituyhteyksissä reitti asiakkaan ja operaattorin välillä on suhteellisen lyhyt, tavallisesti muutamia kilometrejä. Satelliittilaajakaistan tapauksessa linkki kulkee asiakasterminaalilta geostationääriseen satelliitin kautta maa-aseman Gatewaylle, jolloin matkaa linkille kertyy noin 80 000 km. Vastauksen asiakasterminaalille pyyntöön on vielä palattava takaisin samaa reittiä takaisin, joten matkaa yhdelle pyynnölle kertyy 160 000 km. Vaikka radioaallot kulkevat valonnopeudella, synnyttää pitkä välimatka viivettä signaalille. Teoreettisesti laskettuna minimivasteaika paketille on 530 ms. Todellisuudessa viive on vieläkin suurempi, noin 650 ms [2].

2.1 Jakelutekniikka

Satelliittilaajakaistan infrastruktuuri koostuu kymmenestä maa-asemasta, KA-SAT-satelliitista ja asiakasterminaalista. Maa-asemat toimivat palveluntarjoajan Gateway-asemana asiakasterminaalien ja Internetin välillä. Ne ovat sijoitettuna ympäri satelliitin katealuetta. KA-SAT-satelliitti toimii linkkinä maa-aseman ja asiakasterminaalien välillä ja sijaitsee geostationäärisellä radalla positiossa 9°E. Satelliitissa on useita suunta-antenneja, ja sen katealue määräytyy spottien mukaan. Spotteja on 82, joista 2 on varaspottia, ja ne on suunnattu kattamaan mahdollisimman suuren osan asutettua aluetta jakelusektorilla. Kuvasta 1 nähdään, että Spot 70 kattaa Länsi-Suomen ja sisältää työssä tarkasteltavan lähetteen.



Kuva 1. Spottit [3].

Satelliittilaajakaistan taajuusalueena on Downlinkille 17,2- 20,1 GHz ja Uplinkille 27,5 - 30 GHz. Taulukosta 1 nähdään lähetteen keskitäajuuudet, polarisaatiot ja symbolinopeudet.

Taulukko 1. Spottien tiedot [3].

Beam number (spot)	Beam color	Symbol rate	Center frequency	Polarization
1 (s70, s55)	Blue	50	19.73125	RHCP
2 (s76, s71)	Orange	50	19.99375	RHCP
3 (s64, s62)	Purple	50	20.11875	LHCP
4 (s75, s63)	Green	50	19.85625	LHCP

2.2 Referenssiterminaali

Satelliittilaajakaistan vastaanottolaitteistoon kuuluvat lautasantenni, TRIA, välitaajuuskaapelit ja modeemi. Antenni sijoitettiin Turun ammattikorkeakoulun ICT-rakennuksen katolle (kuva 2), josta saatiin esteetön näkymä KA-SAT-satelliitin suuntaan. Mikropää kytkettiin modeemiin kahdella 30 m:n välitaajuuskaapelilla. Toisessa kaapelissa kulkee Downlink-välitaajuus ja toisessa Uplink-välitaajuus

sekä mikropään käyttöjännite. Antennin suuntaukseen saatiin tarkat tiedot Toowayn Satfinderista [4]. Likimääräiseen suuntaukseen käytettiin kompassia ja kaltevuusmittaria. Hienosäätöä varten TRIA:ssa on sisäänrakennettu äänisignaali, joka ilmoittaa signaalivoimakkuuden. Tällä menetelmällä tehdyssä suuntauksessa suuntausvirhe on keskimäärin 0,5 dB:ä [5].

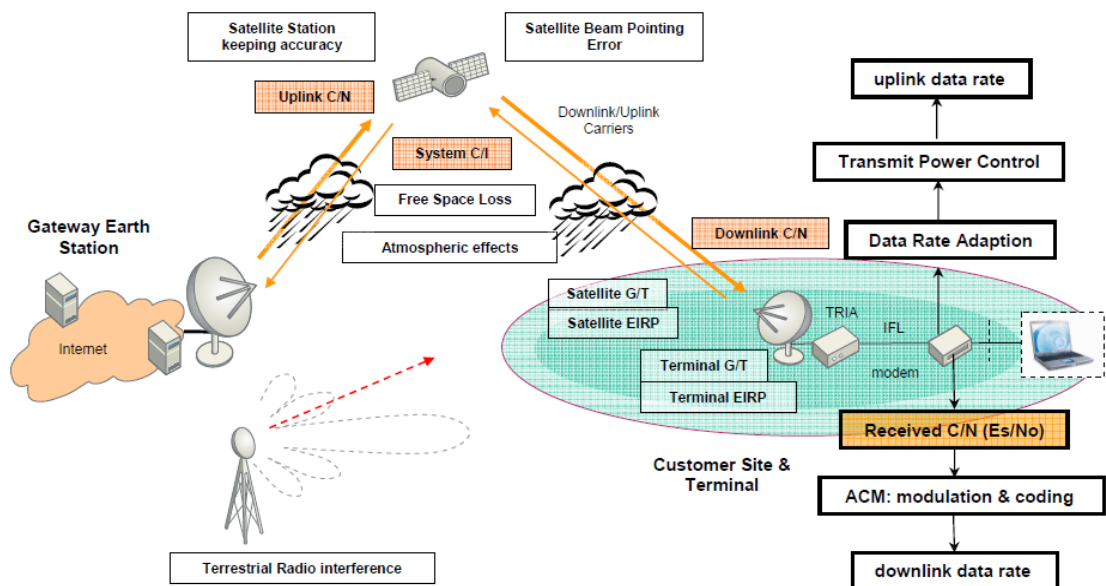


Kuva 2. Tooway-antenni ja mikropää.

Tarkempaan suuntaukseen käytettiin satelliitin majakkasignaalia. Moduloimaton majakkasignaali näkyi spektrissä yksittäisenä piikkinä taajuudella 1 132 MHz. Spektrianalysaattorilla mitattiin majakkasignaalin C/N-arvo, ja hienosäätämällä antennin suuntausta löydettiin maksimaalinen signaalivoimakkuus.

3 LINKKIBUDJETTI

Tämän työn linkkibudjettilaskuissa keskitytään Forward-osuuteen, koska vain sitä voidaan mitata asiakasterminaalilta. Forward-linkillä tarkoitetaan maa-asemalta lähtevää linkkiä, joka kulkee KA-SAT-satelliitin kautta referenssiterminaalille. Linkkiin kuuluu maa-aseman ja satelliitin välinen Uplink-osuus sekä satelliitin ja asiakasterminaalin välinen Downlink-osuus. Näiden lisäksi yhteyden laatuun vaikuttavat interferenssit I_{Total} , jotka koostuvat intermodulaatiosäröistä, ristipolarisaatiosta sekä muiden satelliittien ja maa-asemien läheteistä. Kuvassa 3 on havainnollistettu linkin parametrit [3].



Kuva 3. Linkkiparametrit [3].

Kuvasta 3 nähdään, että ilmakehä ja vapaan tilan vaimennus "Free Space Loss" vaikuttavat heikentävästi signaalin voimakkuuteen. "Satellite Station Keeping Accuracy"-parametri kuvaa satelliitin liikehdinnän kompensointia taivaalla.

Kuvasta nähdään myös, että modeemi osaa ACM:n avulla vaihtaa modulaatiota ja koodausta vastaanotetun C/N-arvon perusteella.

Satelliittilaajakaistan C/N ilman interferenssejä saadaan laskemalla yhteen Uplink- ja Downlink-osuudet kaavalla [6]

$$\frac{C}{N} = \left[\left(\frac{C}{N} \right)_D^{-1} + \left(\frac{C}{N} \right)_U^{-1} \right]^{-1}. \quad (1)$$

Tässä työssä lasketaan tietyt marginaalit, joiden sisällä yhteys toimii ja tulee todennäköisesti toimimaan tulevaisuudessa. Tarkkoja arvoja ei ole saatavilla kaikista maa-aseman ja satelliitin olennaisista parametreista, joten niitä on osittain arvioitava saatavissa olevan tiedon perusteella.

3.1 C/N_{Uplink}

Viasatin maa-asemasta ja Skylogicin satelliitista on niukasti tietoa saatavilla. Maa-asemasta tiedetään, että antennin koko on 9,1 m, vahvistus 67,0 dBi 30 GHz:llä ja syötön vaimennus on alle 0,53 dB [7].

Jotta voitaisiin laskea tarkka arvo C/N_{Uplinkille}, olisi lisäksi tiedettävä maa-aseman lähetysteho, satelliitin syötön vaimennus, KA-SAT-antennin vahvistus ja kohinalämpötilat.

Maa-aseman EIRP, eli lähetystehon ja antennin vahvistuksen yhteistulos, josta on vähennetty laitteiston häviöt, saadaan laskettua kaavalla [8, s.218]

$$EIRP_{ES} = \frac{P_{TX} G_{Tmax}}{L_T L_{FTX}}, \quad (2)$$

missä

P_{TX} = lähetysteho (dB)

L_{FTX} = syötön häviöt

$$G_{Tmax} = \eta \left(\frac{\pi D f_U}{c} \right)^2 \quad (3)$$

$$L_T(dB) = 12 \left(\frac{\theta_T D f_U}{70c} \right)^2 \quad (4)$$

G_{Tmax} = maksimi vastaanottovahvistus

D = antennin halkaisija

η = antennin hyötysuhde

f_U = taajuus (uplink)

c = valonnopeus (3×10^8 m/s)

θ_T = Maximum Pointing Error.

Uplinkin siirtotien vaimennukset saadaan laskemalla yhteen vapaan tilan vaimennus L_{FS} ja ilmakehän vaimennukset L_A . Vapaan tilan vaimennus saadaan laskettua kaavalla

$$L_{FS} = \left(\frac{4\pi R f_U}{c} \right)^2, \quad (5)$$

missä

R = maa-aseman ja satelliitin välinen etäisyys.

Satelliitin G/T, eli vahvistuksen ja kohinalämpötilan suhde, lasketaan kaavalla

$$(G/T)_{SL} = \frac{\frac{G_{Rmax}}{L_R L_{FRX} L_{POL}}}{\left[\frac{T_A}{L_{FRX}} + T_F \left(1 - \frac{1}{L_{FRX}} \right) + T_{eRx} \right]}, \quad (6)$$

missä

$$G_{Rmax} = \eta (\pi 70 / \theta_{3dB})^2 \quad (7)$$

G_{Rmax} = maksimi lähetysvahvistus

θ_{3dB} = vastaanotetun keilan tehon puolittumisen kulma

$$L_R(dB) = 12 \left(\frac{\theta_R D f_U}{70c} \right)^2 \quad (8)$$

L_{FRX} = antennin ja vastaanottimen väliset häviöt

L_{POL} = depolarisaatiosta johtuvat häviöt

$$T_{eRx} = (F - 1)T_0 \quad (9)$$

F = vastaanottimen kohinaluku

T_A = antennin kohinalämpötila

T_F = syötön termodynaaminen lämpötila

$T_0 = 290$ K

$(C/N_0)_U$ saadaan laskettua kaavalla

$$(C/N_0)_U = (EIRP)_{ES} \left(\frac{1}{L_U}\right) \left(\frac{G}{T}\right)_{SL} \left(\frac{1}{k}\right). \quad (10)$$

k = Boltzmannin vakio ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)

Maa-aseman EIRP on 80 dB*i* 250 MHz:lla [5]. Maa-asema sijaitsee Torinossa, Italiassa [3]. Satelliitin G/T:n tarkkaan laskemiseen ei ole riittävää tietoa, joten sille on annettu 3 eri arvoa, jotta nähdään miten $(C/N_0)_U$ muuttuu sen perusteella, kuten taulukosta 2 nähdään.

Taulukko 2. C/N_U .

Maa-aseman EIRP [dBW]	80	80	80
Matkaa satelliitille [km]	37931	37931	37931
Vapaan tilan vaimennus [dB]	-213,5	-213,5	-213,5
Ilmakehän vaimennukset [dB]	-0,7	-0,7	-0,7
1/k [dBK ⁻¹]	228,6	228,6	228,6
Satelliitin G/T [dB/K]	10	15	20
$(C/N_0)_U$ [dB]	104,4	109,4	114,4
$(C/N)_U$ 50 MHz:n kaistalle [dB]	27,4	32,4	37,4

3.2 C/N_{Downlink}

Satelliitin EIRP saadaan laskettua kaavalla [8, s.221]

$$EIRP_{SL} = \frac{P_{TX} G_{Tmax}}{L_T L_{FTX}} \quad (11)$$

$$G_{Tmax} = \eta \left(\frac{\pi D f_U}{c} \right)^2 \quad (12)$$

missä

L_T = vastaanottimen sijainnista spotin keskipisteeseen nähden johtuva häviö

L_{FTX} = syötön häviöt

D = lähettävän antennin halkaisija

η = lähettävän antennin hyötysuhde

f_U = taajuus (downlink).

Downlinkille siirtotien vaimennukset saadaan laskemalla yhteen vapaan tilan vaimennus L_{FS} ja ilmakehän vaimennukset L_A . Vapaan tilan vaimennus saadaan laskettua kaavalla

$$L_{FS} = \left(\frac{4\pi R f_U}{c} \right)^2, \quad (13)$$

missä

R = satelliitin ja asiakasterminaalin välinen etäisyys.

Asiakasterminaalin G/T saadaan kaavalla

$$(G/T)_{VSAT} = \frac{G_{Rmax}}{L_R L_{FRX} L_{POL} T_D}, \quad (14)$$

missä T_D kuvaa downlinkin systeemin lämpökohinaa vastaanottimen sisääntulossa ja se voidaan laskea kaavalla

$$T_D = \frac{T_A}{L_{FRX}} + T_F \left(1 - \frac{1}{L_{FRX}}\right) + T_{eRx}. \quad (15)$$

G_{Rmax} lasketaan kaavalla

$$G_{Rmax} = \eta(\pi D f_D / c)^2, \quad (16)$$

missä

η = vastaanottavan antennin hyötysuhde

D = vastaanottavan antennin halkaisija

f_D = taajuus (downlink)

$$L_R(dB) = 12 \left(\frac{\theta_R D f_U}{70c} \right)^2 \quad (17)$$

θ_R = Maximum Pointing Error

L_{FRX} = antennin ja vastaanottimen väliset häviöt

L_{POL} = depolarisaatiosta johtuvat häviöt

T_A = antennin kohinalämpötila, saadaan laskemalla yhteen taivaan ja maan kohinalämpötilat

T_F = syötön termodynaaminen lämpötila

$T_0 = 290$ K

$$T_{eRx} = (F - 1)T_0. \quad (18)$$

C/N downlinkille saadaan laskettua kaavalla

$$(C/N_0)_D = (EIRP)_{SL} \left(\frac{1}{L_D} \right) \left(\frac{G}{T} \right)_{VSAT} \left(\frac{1}{k} \right). \quad (19)$$

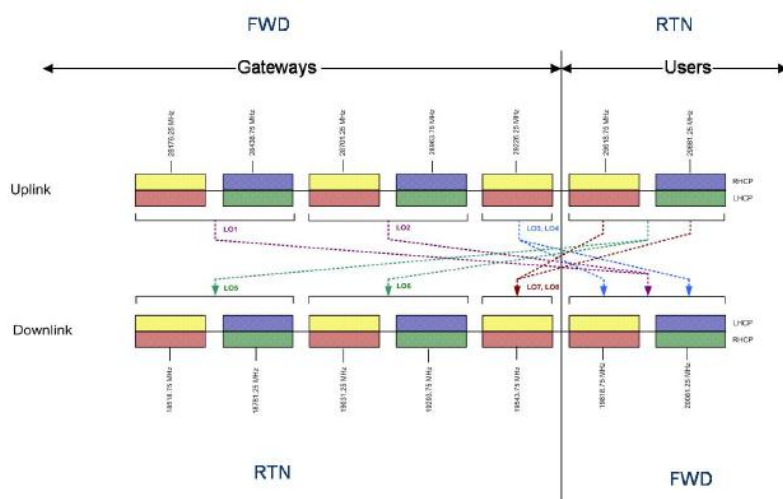
KA-SATin Spot 70:n lähetteen saturaatio-EIRP on useiden lähteiden mukaan 62 dBi [5]. Taulukossa 3 downlinkin C/N arvioidaan eri EIRP-arvojen perusteella.

Taulukko 3. C/N_D .

Satelliitin EIRP [dBW]	58	60	62
Matkaa satelliittille [km]	39500	39500	39500
Vapaan tilan vaimennus [dB]	-210,3	-210,3	-210,3
Ilmakehän vaimennukset [dB]	-1	-1	-1
1/k [dBK-1]	228,6	228,6	228,6
Antennin G/T [dB/K]	17,5	17,5	17,5
$(C/N_0)_D$ [dB]	92,8	94,8	96,8
$(C/N)_D$ 50 MHz kaistalle [dB]	15,81	17,81	19,81

3.3 C/I_{IMD}

Satelliitin transpondereiden epälinearisuudet amplitudissa ja vaiheessa aiheuttavat intermodulaatiosäröä. Tämä vuorostaan aiheuttaa intermodulaatiointerferenssiä linkille. Kuvasta 4 nähdään KA-SAT-transponderikaavio, jonka avulla voidaan laskea intermodulaatiosäröjen taajuudet. Taajuuksien lisäksi olisi tiedettävä transponderin vahvistimen ominaisuudet, jotta voitaisiin laskea tarkat arvot intermodulaatiointerferenssille.



Kuva 4. KA-SAT transponderikaavio [9].

Transponderin intermodulaatiosäröt voidaan laskea vertaamalla intermodulaation EIRP:iä lähetteen EIRPiin. Esimerkiksi:

Intermodulaation EIRP: -10 dBW/4kHz

Lähetteen EIRP: 60 dBW

$-10 \text{ dBW/4kHz} * 50 \text{ MHz} = 30,97 \text{ dBW}$

$60 \text{ dBW} - 30,97 \text{ dBW} = 29 \text{ dB}$

Taulukosta 4 nähdään, miten intermodulaatiosäröt muuttuvat intermodulaation EIRP:in ja lähetteen EIRP:in suhteen.

Taulukko 4. Intermodulaatiosäröt.

Intermodulaation EIRP (dBW/4kHz)	Lähetteen EIRP dBW	Intermodulaatiosäröt dB
-10	60	29
-8	60	27
-6	60	25
-4	60	23

3.4 C/I_{XPD}

Satelliitilla ja vastaanottoantennilla on rajalliset erotuskyvyt eri polarisaatioiden välillä. Ristipolarisaatiointerferenssit syntyvät, kun yhdeltä polarisaatiolta siirtyy energiaa sen ortogonaaliselle polarisaatiolle. Toowayn tapauksessa 0,75 m antennin $XPD_{V_{sat}}$ eli ristipolarisaatio-diskriminaatio, on $>20 \text{ dB}$ 1 dB:n keilanleveyden alueella [10]. Luku kertoo, kuinka hyvin antenni erottelee ortogonaaliset polarisaatiot toisistaan 1 dB:n keilanleveyden alueella. Jotta voitaisiin laskea koko linkin netto ristipolarisaatio-diskriminaatio, olisi myös tiedettävä satelliitin XPD_{SL} . Nämä voidaan laskea yhteen kaavalla [11]

$$X_{min} = \frac{1}{2}(X_{Vsat}^{-1} + X_{SL}^{-1})^{-1}. \quad (20)$$

Laskemalla minimi ristipolarisaatio-diskriminaatio saadaan ns. ”worst case scenario” ristipolarisaatiointerferenssille $(C/I)_{Xmin} = X_{min}$. Tätä voidaan käyttää hyväkseen linkkibudjetin suunnittelussa. Satelliitin ristipolarisaatio-diskriminaatio on paljon suurempi kuin referenssterminaalin vastaava [11], joten oletetaan $(C/I)_{Xmin}$ olevan 20 dB.

3.5 C/I_{Uplink}

Uplinkille interferenssiä aiheuttavat muut maa-asemat ja terminaalit, mikäli niiden läheteet ovat samalla taajuudella ja polarisaatiolla. Vastaanottavan antennin sivukeilat sieppaavat läheteitä viereisiltä maa-asemilta, joka synnyttää interferenssiä linkille. EESS 502 spesifikaation mukaan maa-asemille ja terminaaleille asetetaan kuitenkin rajoituksia, joka rajoittaa niiden aiheuttavaa interferenssiä [12]. Kuvassa 5 nähdään Viasatin 9,1 m maa-aseman säteilykuvio. Sininen viiva kuvaa mitattua säteilykuviota. Musta viiva on maa-aseman säteilykuvion FCC-spesifikaatio [5].

C/I uplinkille saadaan laskettua kaavalla

$$\left(\frac{C}{I}\right)_U = \left(\frac{EIRP}{EIRP'}\right)\left(\frac{G_U}{G'_U}\right), \quad (21)$$

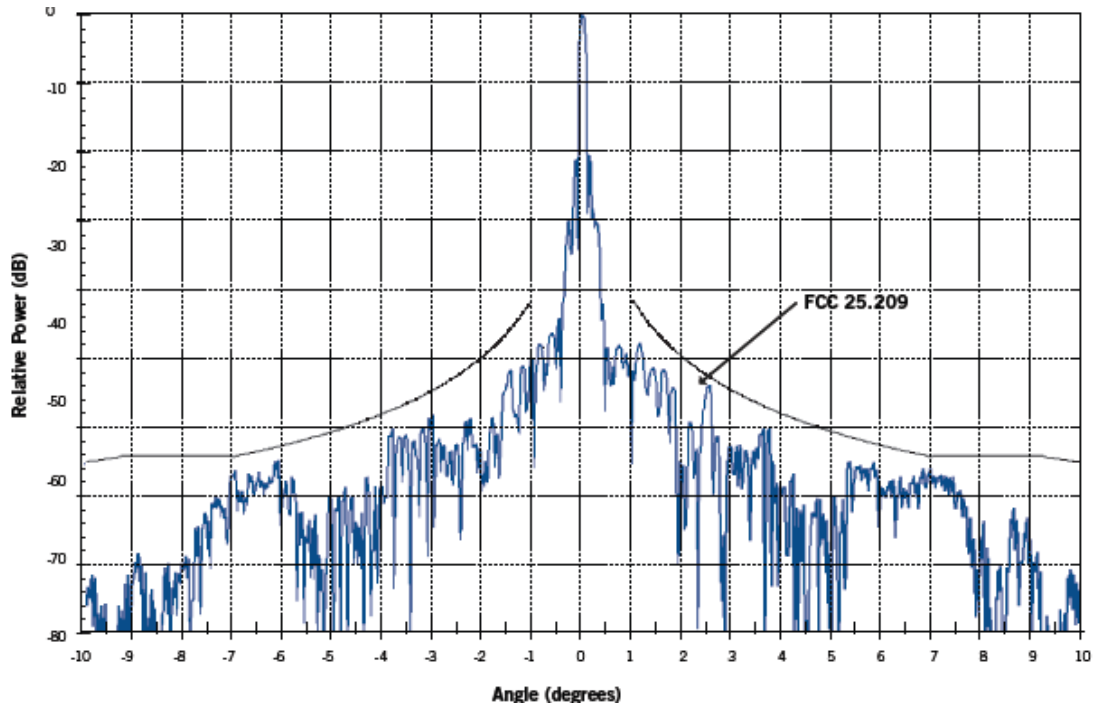
missä

$EIRP$ = häiritävän maa-aseman $EIRP$

$EIRP'$ = häiritsevän maa-aseman $EIRP$

G_U = antennin vahvistus häiritävän maa-aseman suuntaan

G'_U = antennin vahvistus häiritsevän maa-aseman suuntaan.



Kuva 5. Viasat VA-91-KA 9,1 m -maa-aseman säteilykuvio 29,57 GHz:llä [7].

C/I uplinkille on näiden tietojen valossa erittäin minimaalista, joten voidaan antaa sille arvoksi 40 dB, joka tarkoittaa sen olevan lähes merkisemätöntä C/Ntaliin.

3.6 C/I_{Downlink}

Downlinkin interferenssi aiheutuu läheisten satelliittien lähettestä, jotka asiakas-terminaalin antennin sivukeilat vastaanottavat. Tällä hetkellä tämäntyyppinen interferenssi on minimaalista, sillä mikään KA-SATin viereisistä satelliiteista ei sisällä lähetteitä samalla taajuudella ja polarisaatiolla kuin Tooway satelliittilaa- jakaista. Tilanne saattaa muuttua muutaman vuoden kuluttua jos vierekkäiset satelliitit aloittavat toimintansa samalla taajuudella ja polarisaatiolla. Downlinkille C/I lasketaan kaavalla [11]

$$\left(\frac{C}{I}\right)_D = \left(\frac{EIRP}{EIRP'}\right)\left(\frac{G_D}{G'_D}\right), \quad (22)$$

missä

EIRP = häiritävän satelliitin EIRP

$EIRP'$ = häiritsevän satelliitin EIRP

G_D = antennin vahvistus häiritävän satelliitin suuntaan

G'_D = antennin vahvistus häiritsevän satelliitin suuntaan.

C/I downlinkille oletetaan myös merkitsemättömäksi, joten myös sille annetaan arvoksi 40 dB.

3.7 Linkkibudjetin osien yhdistäminen

Linkkibudjetti koostuu edellä mainituista osista ja nämä on laskettava yhteen, jotta saadaan modeemin vastaanottama C/N. Linkkibudjetin C/N_{Total} saadaan laskettua kaavalla [11]

$$\frac{C}{N_{Total}} = \left[\left(\frac{C}{N} \right)_D^{-1} + \left(\frac{C}{N} \right)_U^{-1} + \left(\frac{C}{I} \right)_U^{-1} + \left(\frac{C}{I} \right)_D^{-1} + \left(\frac{C}{I} \right)_{XPD}^{-1} + \left(\frac{C}{I} \right)_{IMD}^{-1} \right]^{-1} \quad (23)$$

Taulukossa 5 on laskettu teoreettiset ylä- ja alarajat linkkibudjetille kirkaalla kelillä.

Taulukko 5. Ylä- ja alarajamarginaalit linkkibudjetille.

C/N_U	27,5	32,5	37,5
C/N_D	15,81	17,81	19,81
C/I_U	40	40	40
C/I_D	40	40	40
C/I_{XPD}	25	30	35
C/I_{IMD}	23	25	27
C/N_{TOTAL}	14,39	16,68	18,81

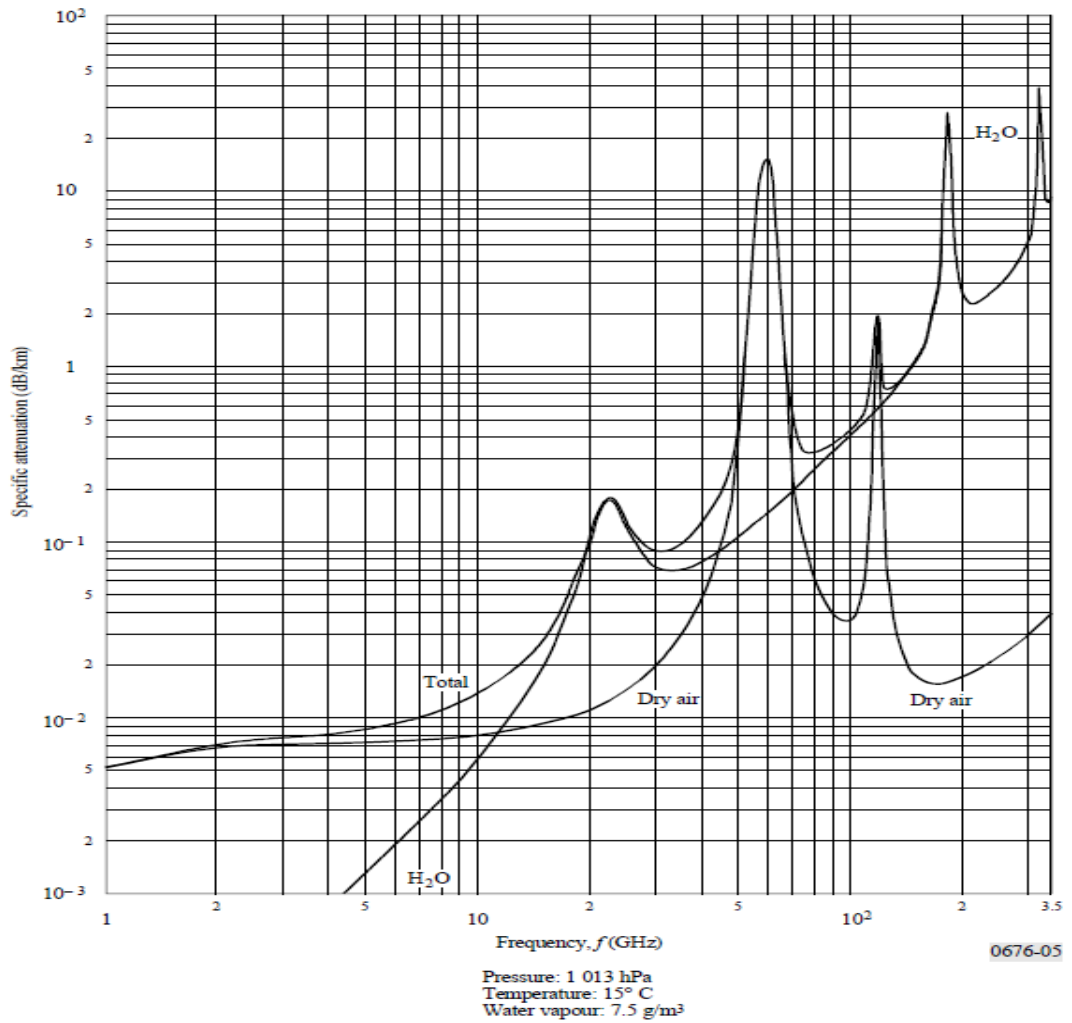
4 ILMAKEHÄN VAIKUTUKSET

4.1 Ilmakehän kaasujen vaikutukset

Radioaaltojen etenemisen kannalta tärkeimmät ilmakehän kerrokset ovat troposfääri ja ionosfääri. Ionosfääri vaikuttaa signaalin etenemiseen mikroaluetta alemmilla taajuuksilla, eikä sillä silloin ole suurta vaikutusta satelliittitietoliikenteeseen [13].

Troposfäärin kaasumolekyylien aiheuttama vaimennus riippuu taajuudesta, paineesta, lämpötilasta ja vesihöyryn määrästä. Kaasut aiheuttavat radioaalloille molekyyliabsorptiota, jossa molekyylin rotaatioenergia vaihtuu toiseksi. Tämä tapahtuu tietyillä resonanssitaajuuksilla, ja troposfäärin kaasuista vain hapella ja vesihöyryllä on havaittavat resonanssitaajuudet mikroaaltoalueella. Kuviosta 1 voidaan nähdä resonanssitaajuudet piikkeinä. Piikkien välille jääviä alueita kutsutaan ikkunoiksi, ja niitä taajuuksia on vaimennusten kannalta järkevää käyttää maa-asemien ja satelliittien väliseen kommunikaatioon [13].

Vaimennuskerroin kuivalle ilmalle ja vesihöyrylle saadaan yksinkertaisilla kaavoilla 3 ja 8 [13]. On olemassa tarkempi menetelmä vaimennuskertoimen laskemiseen, mutta yksinkertaiset kaavat antavat satelliittilaajakaistan käyttämällä taajuudella riittävän tarkat arvot. Ero yksinkertaisemman ja tarkemman kaavan välillä on yleisesti alle 0,1 dB/km ja on maksimissaan 0,7 dB/km taajuudella 60 GHz.



Kuvio 1. Ilmakehän kaasujen aiheuttama ominaisvaimennus standardi-ilmakehässä [13].

Kuivalle ilmalle vaimennuskertoin γ_0 (dB/km) saadaan kaavasta [13]

kun $f \leq 54$ GHz

$$\gamma_0 = \left[\frac{7.2 r_t^{2.8}}{f^2 + 0.34 r_p^2 r_t^{1.6}} + \frac{0.62 \xi_3}{(54 - f)^{1.16 \xi_1} + 0.83 \xi_2} \right] f^2 r_p^2 \times 10^{-3} \quad (24)$$

$$\xi_1 = \phi(r_p, r_t, 0.0717, -1.8132, 0.0156, -1.6515) \quad (25)$$

$$\xi_2 = \phi(r_p, r_t, 0.5146, -4.6368, -0.1921, -5.7416) \quad (26)$$

$$\xi_3 = \phi(r_p, r_t, 0.3414, -6.5851, 0.2130, -8.5854) \quad (27)$$

$$\phi(r_p, r_t, a, b, c, d) = r_p^a r_t^b \exp[c(1 - r_p) + d(1 - r_t)], \quad (28)$$

missä

f : taajuus (GHz)

rp : p/1013

rt : 288/(273 + t)

p : paine (hPa)

t : lämpötila (°C).

Vesihöyrylle vaimennuskertoin γ_w (dB/km) saadaan kaavasta [13]

$$\gamma_w = \left\{ \begin{aligned} & \frac{3.98\eta_1 \exp[2.23(1-r_t)]}{(f-22.235)^2 + 9.42\eta_1^2} g(f,22) + \frac{11.96\eta_1 \exp[0.7(1-r_t)]}{(f-183.31)^2 + 11.14\eta_1^2} \\ & + \frac{0.081\eta_1 \exp[6.44(1-r_t)]}{(f-321.226)^2 + 6.29\eta_1^2} + \frac{3.66\eta_1 \exp[1.6(1-r_t)]}{(f-325.153)^2 + 9.22\eta_1^2} \\ & + \frac{25.37\eta_1 \exp[1.09(1-r_t)]}{(f-380)^2} + \frac{17.4\eta_1 \exp[1.46(1-r_t)]}{(f-448)^2} \\ & + \frac{844.6\eta_1 \exp[0.17(1-r_t)]}{(f-557)^2} g(f,557) + \frac{290\eta_1 \exp[0.41(1-r_t)]}{(f-752)^2} g(f,752) \\ & + \frac{8.3328 \times 10^4 \eta_2 \exp[0.99(1-r_t)]}{(f-1780)^2} g(f,1780) \end{aligned} \right\} f^2 r_t^{2.5} \rho \times 10^{-4} \quad (29)$$

$$\eta_1 = 0.955r_p r_t^{0.68} + 0.006 \rho \quad (30)$$

$$\eta_2 = 0.735r_p r_t^{0.5} + 0.0353r_t^4 \rho \quad (31)$$

$$g(f, f_i) = 1 + \left(\frac{f - f_i}{f + f_i} \right)^2 \quad (32)$$

Kuivalle ilmalle ekvivalenttinen korkeus saadaan kaavasta [13]

$$h_0 = \frac{6.1}{1 + 0.17r_p^{-1.1}} (1 + t_1 + t_2 + t_3), \quad (33)$$

missä

$$t_1 = \frac{4.64}{1 + 0.066r_p^{-2.3}} \exp \left[\left(\frac{f - 59.7}{2.87 + 12.4 \exp(-7.9r_p)} \right)^2 \right] \quad (34)$$

$$t_2 = \frac{0.14 \exp(2.12r_p)}{(f - 118.75)^2 + 0.031 \exp(2.2r_p)} \quad (35)$$

$$t_3 = \frac{0.0114}{1 + 0.14 r_p^{-2.6}} f \frac{-0.0247 + 0.0001f + 1.61 \times 10^{-6} f^2}{1 - 0.0169f + 4.1 \times 10^{-5} f^2 + 3.2 \times 10^{-7} f^3} \quad (36)$$

rajoituksella

$$h_0 \leq 10.7 r_p^{0.3} \text{ kun } f < 70 \text{ GHz.}$$

Ekvivalenttinen korkeus vesihöyrylle saadaan kaavasta [13]

$$h_w = 1.66 \left(1 + \frac{1.39\sigma_w}{(f - 22.235)^2 + 2.56\sigma_w} + \frac{3.37\sigma_w}{(f - 183.31)^2 + 4.69\sigma_w} + \frac{1.58\sigma_w}{(f - 325.1)^2 + 2.89\sigma_w} \right), \quad (37)$$

kun $f \leq 350$ GHz

$$\sigma_w = \frac{1.013}{1 + \exp[-8.6(r_p - 0.57)]}. \quad (38)$$

elevaatiokulmalle ϕ välillä 5° ja 90° , kokonaisvaimennus saadaan kaavalla [13]

$$A = \frac{A_0 + A_w}{\sin\phi}, \quad (39)$$

missä $A_0 = h_0\gamma_0$ ja $A_w = h_w\gamma_w$.

Taulukosta 6 nähdään kaasujen aiheuttama vaimennus eri elevaatiolla lämpötilassa 0°C , ilmanpaineessa 1050 hPa ja ilmankosteudella 5 g/m^3 .

Taulukko 6. Kaasujen vaimennus eri elevaatioilla.

Elevaatio ($^\circ$)	Kaasuvaimennus (dB)	
	20 GHz	30 GHz
10	1,12	1,35
12	0,93	1,13
14	0,8	0,97
16	0,7	0,85
18	0,63	0,76
20	0,57	0,68

4.2 Pilvi- ja sumuvaimennus

Pilven tai sumun aiheuttama vaimennus γ_c saadaan kaavasta [14]

$$\gamma_c = K_l M \frac{\text{dB}}{\text{km}}, \quad (40)$$

missä

γ_c : spesifinen vaimennus (dB/km) pilven sisällä

K_l : spesifinen vaimennuskerroin ((dB/km)/(g/m³))

M : vesitiheys pilven sisällä (g/m³).

Spesifinen vaimennuskerroin saadaan kaavasta

$$K_l = \frac{0.819f}{\epsilon''(1 + \eta^2)} \frac{\frac{\text{dB}}{\text{km}}}{\frac{\text{g}}{\text{m}^3}}, \quad (41)$$

missä f on taajuus (GHz) ja

$$\eta = \frac{2 + \epsilon'}{\epsilon''}. \quad (42)$$

Veden dielektrinen permittiivisyys saadaan kaavalla

$$\epsilon''(f) = \frac{f(\epsilon_0 - \epsilon_1)}{f_p \left[1 + \left(\frac{f}{f_p} \right)^2 \right]} + \frac{f(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{f_s \left[1 + \left(\frac{f}{f_s} \right)^2 \right]}, \quad (43)$$

missä

$$\epsilon_0 = 77.6 + 103.3 (\theta - 1) \quad (44)$$

$$\epsilon_1 = 5.48 \quad (45)$$

$$\epsilon_2 = 3.51 \quad (46)$$

$$\theta = 300 / T \quad (47)$$

ja T on lämpötila (K) sekä

$$f_p = 20.09 - 142 (\theta - 1) + 294 (\theta - 1)^2 \text{ GHz} \quad (48)$$

$$f_s = 590 - 1500 (\theta - 1) \text{ GHz}. \quad (49)$$

Pilvivaimennus voidaan laskea tietylle todennäköisyydelle, jos tiedetään pilvimassan tilastollinen vesipitoisuus L (kg/m³)

$$A = \frac{LK_l}{\sin \theta}. \quad (50)$$

Taulukosta 7 nähdään, miten pilvivaimennus muuttuu elevaation mukaan lämpötilassa 0 °C, ilmanpaineessa 1050 hPa ja ilmankosteudella 5 g/m³

Taulukko 7. Pilvivaimennus eri elevaatioilla.

Elevaatio (°)	Pilvivaimennus (dB)	
	20 GHz	30 GHz
10	0,4	0,88
12	0,34	0,74
14	0,29	0,63
16	0,25	0,55
18	0,23	0,49
20	0,2	0,45

4.3 Troposfääriskintillaatio

Troposfäärissä esiintyy taitekertoimen vaihteluita, kun ilmamassat liikkuvat toistensa suhteen. Radioaallon kohdatessa taitekertoimen vaihteluita syntyy siron-taa. Tämä aiheuttaa amplitudin ja vaiheen nopeita vaihteluita, ja ilmiötä kutsutaan skintillaatioksi. Skintillaatio lasketaan seuraavalla ITU-R menetelmällä [15]:

$$\sigma N_{wet} = \frac{3730 \times H e_s}{(t + 273)^2}, \quad (51)$$

missä H on suhteellinen kosteus (%) ja kyllästyneen vesihöyryn osapaine e_s (Hpa) on

$$e_s = 6.1121 e^{\frac{17.502t}{t+240.97}} \quad Hpa. \quad (52)$$

Nyt voidaan laskea signaalin amplitudin standardivaihtelu [16]

$$\sigma_{ref} = 3.6 \times 10^{-3} + 10^{-4} \times N_{wet} \quad \text{dB} \quad (53)$$

On tiedettävä myös signaalin efektiivinen radanpituus

$$L = \frac{2000}{\sqrt{\sin^2 \theta + 2.35 \times 10^{-4} + \sin \theta}} \quad \text{m} \quad (54)$$

ja antennin efektiivinen halkaisija, mikä lasketaan antennin halkaisijan ja hyötysuhteen perusteella kaavalla

$$D_{eff} = \sqrt{\eta} D \quad \text{m} \quad (55)$$

On vielä laskettava antennin aukon keskiarvoistava funktio

$$g(x) = \sqrt{3.86 (x^2 + 1)^{11/12} \cdot \sin \left[\frac{11}{6} \arctan \frac{1}{x} \right] - 7.08 x^{5/6}} \quad (56)$$

missä

$$x = 1.22 D_{eff}^2 (f / L) \quad (57)$$

Näillä arvoilla voidaan laskea amplitudiskintillaation rms-arvo kaavalla

$$\sigma = \sigma_{ref} f^{7/12} \frac{g(x)}{(\sin \theta)^{1.2}} \quad (58)$$

Eri aikaprosenteille (p) voidaan nyt laskea skintillaation vaikutus kaavalla

$$A_s(p) = a(p) \cdot \sigma \quad \text{dB}, \quad (59)$$

missä $a(p)$ eri aikaprosenteille $0.01 < p \leq 50$

$$a(p) = -0.061 (\log_{10} p)^3 + 0.072 (\log_{10} p)^2 - 1.71 \log_{10} p + 3.0. \quad (60)$$

Taulukosta 8 nähdään skintillaation vaikutus eri elevaatioilla lämpötilassa 0 °C, ilmanpaineessa 1050 hPa, ilman vesitiheydellä 5 g/m³ ja aikaprosentilla 0,01 %.

Taulukko 8. Skintillaation vaikutus eri elevaatioilla.

Elevaatio (°)	Skintillaatio (dB)	
	20 GHz	30 GHz
10	2,1	2,66
12	1,69	0,74
14	1,41	1,78
16	1,2	1,52
18	1,05	1,32
20	0,93	1,17

4.4 Sateen vaikutukset

Sadekorkeus laskettiin kaavasta [13]

$$h_R = h_0 + 0.36 \text{ km}, \quad (61)$$

missä h_0 saatiin liitteestä 1. Seuraavaksi laskettiin etenemistien pituus L_s [16]

$$L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta} \quad \text{km}, \quad (62)$$

missä h_s on maa-aseman korkeus merenpinnasta (km). Horisontaaliprojektion pituus lasketaan kaavalla [16]

$$L_G = L_s \cos \theta \quad \text{km}. \quad (63)$$

Korjauskertoimien laskemiseen on tiedettävä keskimääräinen sadeintensiteetti, $R_{0.01}$, ko. alueelle. Liitteestä 1 nähdään, että keskimääräinen sadeintensiteetti Turussa on 25 (mm/h). Spesifinen vaimennuskerroin γ_R lasketaan käyttämällä taajuusriippuvaisia vakioita k ja α sekä sadeintensiteettiä $R_{0.01}$. Vakiot k ja α saadaan taulukosta liitteestä 1.

$$\gamma_R = k (R_{0.01})^\alpha \quad \text{dB/km} \quad (64)$$

Vaimennuskertoimen avulla lasketaan horisontaalinen korjauskerroin

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f} - 0.38 (1 - e^{-2L_G})}} \quad (65)$$

ja vertikaalinen korjauskerroin $v_{0.01}$

$$v_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left(31 (1 - e^{-(\theta)}) \frac{\sqrt{L_R \gamma_R}}{f^2} - 0.45 \right)} \quad (66)$$

$$L_R = \frac{L_G r_{0.01}}{\cos \theta} \quad \text{km} \quad (67)$$

Efektiiivinen etenemistien pituus on

$$L_E = L_R v_{0.01} \quad \text{km.} \quad (68)$$

Vaimennus, joka ylitetään 0,01 % ajasta saadaan kaavalla

$$A_{0.01} = \gamma_R L_E \quad \text{dB.} \quad (69)$$

Vaimennus muille aikaproseenteille P (0,001 % <P<5 %)

$$A_p = A_{0.01} \left(\frac{P}{0.01} \right)^{-(0.655 + 0.033 \ln(p) - 0.045 \ln(A_{0.01}) - \beta(1-p) \sin \theta)} \quad \text{dB} \quad (70)$$

Jos $p \geq 1\%$ or $|\varphi| \geq 36^\circ$: $\beta = 0$

Jos $p < 1\%$ and $|\varphi| < 36^\circ$ and $\theta \geq 25^\circ$: $\beta = -0.005(|\varphi| - 36)$

Muutoin $\beta = -0.005(|\varphi| - 36) + 1.8 - 4.25 \sin \theta$

Taulukosta 9 nähdään vaimennuksia eri sadeintensiteeteille.

Taulukko 9. Sadevaimennukset.

Sadeintensiteetti (mm/h)	Sadevaimennus (dB/km)	
	20 GHz	30 GHz
1	0,072	0,177
2	0,153	0,356
4	0,323	0,719
8	0,685	1,449
10	0,872	1,816
20	1,847	3,66
40	3,912	7,375
80	8,287	14,865

4.5 Vaimennustekijöiden yhdistäminen

Vaimennustekijät voidaan yhdistää ITU-R mukaan kaavalla [16]

$$A_T(p) = A_G(p) + \sqrt{(A_R(p) + A_C(p))^2 + A_S^2(p)}, \quad (71)$$

missä

$A_G(p)$: kaasujen aiheuttama vaimennus tietyllä aikaprozentilla

$A_R(p)$: sateen aiheuttama vaimennus tietyllä aikaprozentilla

$A_C(p)$: pilvien aiheuttama vaimennus tietyllä aikaprozentilla

$A_S(p)$: skintillaation aiheuttama vaimennus tietyllä aikaprozentilla.

Taulukosta 10 nähdään kokonaisvaimennus eri elevaatioille, kun lämpötila on 0 °C, sadeintensiteetti 10 mm/h, ilmanpaine 1050 hPa, ilman vesitiheys 5 g/m³ ja aikaprozentilla 0,01 %.

Taulukko 10. Kokonaisvaimennukset eri elevaatioilla.

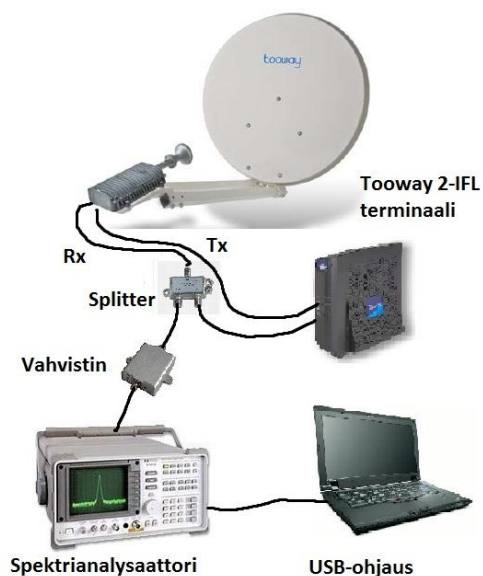
Elevaatio (°)	Kokonaisvaimennus (dB)	
	20 GHz	30 GHz
10	4,42	5,94
12	3,81	5,14
14	3,37	4,58
16	3,05	4,15
18	2,79	3,82
20	2,59	3,56

5 MITTALAITTEISTO

5.1 Mittalaitteisto

Opinnäytetyössä käytetyt mittalaitteistot olivat:

- HP 8590A Spektrianalysaattori
- Triax 2-way splitter 5-2400 MHz
- 30 m välitaajuuskaapelit
- 19 dB vahvistin
- 50->75 Ω converter
- 75->50 Ω converter.

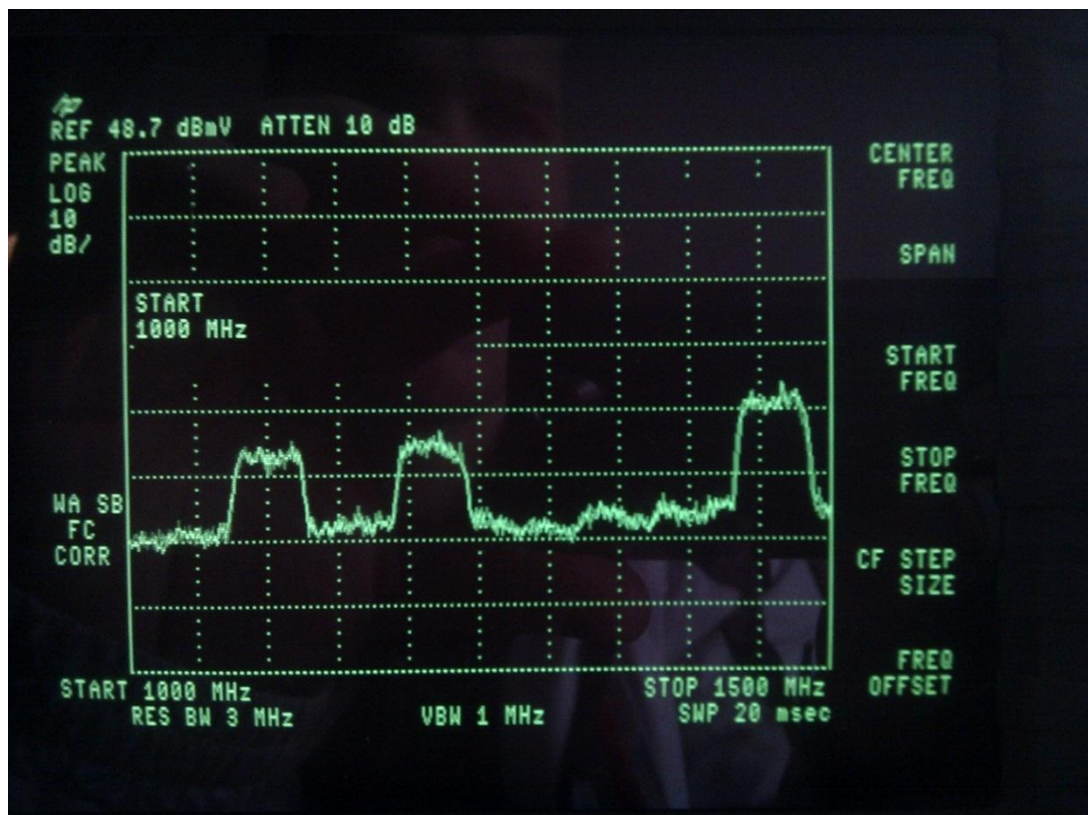


Kuva 6. Mittalaitteiston kytkennät.

Spektrianalysaattori on perustyökalu satelliittimittauksissa, ja sen avulla saatiin tietoa kantaalto-kohinasuhteesta. Satelliittilaajakaistan lähete on matalatehoinen ja kohinatasot ovat pieniä. Signaali vaimenee vielä välitaajuuskaapelissa, joten spektrianalysaattorilla signaalin kohinataso on hyvin lähellä analysaattorin omaa pohjakohinaa. Kun kohinatasot ovat lähellä toisiaan, summautuvat ne

toisiinsa eivätkä mittaukset ole enää luotettavia. Tästä syystä signaali vahvistettiin 19 dB:n vahvistimella ennen spektrianalysaattorille viemistä. Vahvistin oli suunniteltu 50 Ω järjestelmille, joten oli käytettävä impedanssimuuntimia heijastusvaimennusten välttämiseksi. Spektrianalysaattori kytkettiin PC:lle GPIB-USB-adapterilla.

Vastaanoton välitaajuuskaapeli haaroitettiin splitterillä, jolloin saatiin sama signaali spektrianalysaattorille ja modeemille. Spektristä nähdään, että Forward-linkin välitaajuus on 1 000-1 500 MHz välillä. Spektrissä näkyy selvästi 3 eri lähetettä (kuva 7). Yksi lähete on muita vahvempi, joten se kuuluu spotti 70:lle. Kaksi heikompaa lähetettä kuuluvat spotti 76:lle, jonka keskipiste on pääkaupunkiseudun alueella. Tarkasteluun otettiin spotti 70. Tässä tapauksessa C/N mittaamiseen käytettiin markerien avulla tehtyä vertailua kantoaallon ja kohinan välillä. Lähetteen keskeltä valittiin mittauspiste, jota verrattiin lähetteen reunoilla sijaitsevaan pohjakohinaan. Tällä menetelmällä saadaan vertailukelpoisia tuloksia, kunhan vertailupisteet pidetään koko ajan vakiona.



Kuva 7. Spektrikuva downlink-välitaajuudella.

Spektrianalysointilaitteet kalibroitiin ohjekirjan ohjeiden mukaisesti ennen mittauksia. Mittausten jälkeen spektrianalysointilaitteen tarkkuus testattiin vielä vertaamalla sitä kalibroituun spektrianalysointilaitteeseen. Vertailuun käytettiin C/N generaattoria, jonka signaali- ja kohinatasot tiedettiin ja ne varmistettiin vielä kalibroidulla spektrianalysointilaitteella. HP 8590A-spektrianalysointilaitteet todettiin luotettavaksi mittauksiin.

5.2 Tulosten kirjaaminen

Tulosten kirjaamiseksi suunniteltiin yksinkertainen LabVIEW-ohjelma. Ohjelman tarkoituksena oli piirtää kuvaaja C/N:lle ja SNR:lle sekä kirjata tulokset helpo-lukaiseen lokiin. Ohjelma ottaa valitulla aikavälillä spektrianalysointilaitteesta kanta-aallon ja kohinan amplitudit siirtämällä markkeria oikeaan kohtaan sekä lukemalla amplitudiarvoja. Lähetteestä vähennetään kohina, jolloin saadaan C+N/N desibeliasteikolla. Spektrianalysointilaitteelta mitattu kanta-aalto sisältää myös signaalin kohinan, joten jotta saataisiin C/N ilman kohinaa, on käytettävä kohinakorjauksen kaavaa

$$\frac{C}{N} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{C+N}{N}} - 1 \right). \quad (72)$$

Modeemin ilmoittama SNR haettiin modeemin modemStatusData-sivulta [18]. LabVIEW-ohjelma piirtää kuvaajan C/N- ja SNR arvoista sekä kirjaa ne kerran vuorokaudessa lokitiedostoon. Lokitiedostosta tulee ilmi kellonaika, päivämäärä, C/N ja SNR valitulla aikavälillä.

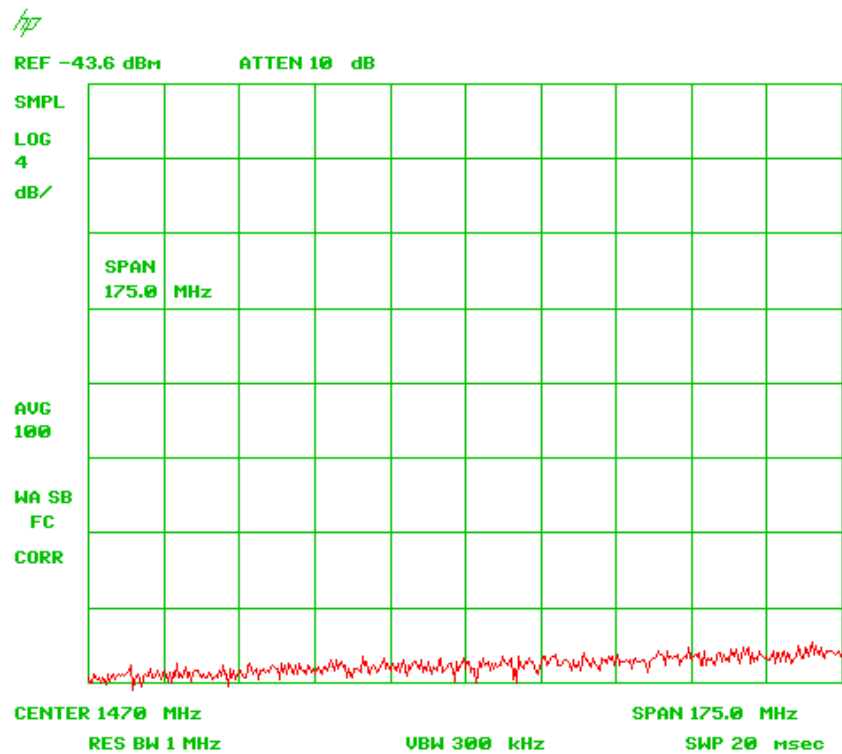
5.3 Mittausaika ja -olosuhteet

Mittaukset suoritettiin 20.03.2012 klo 12:00-15:00 kirkkaalla kelillä. Lämpötila oli 8,5 °C ja suhteellinen ilmankosteus oli 56 %.

6 MITTAUKSET

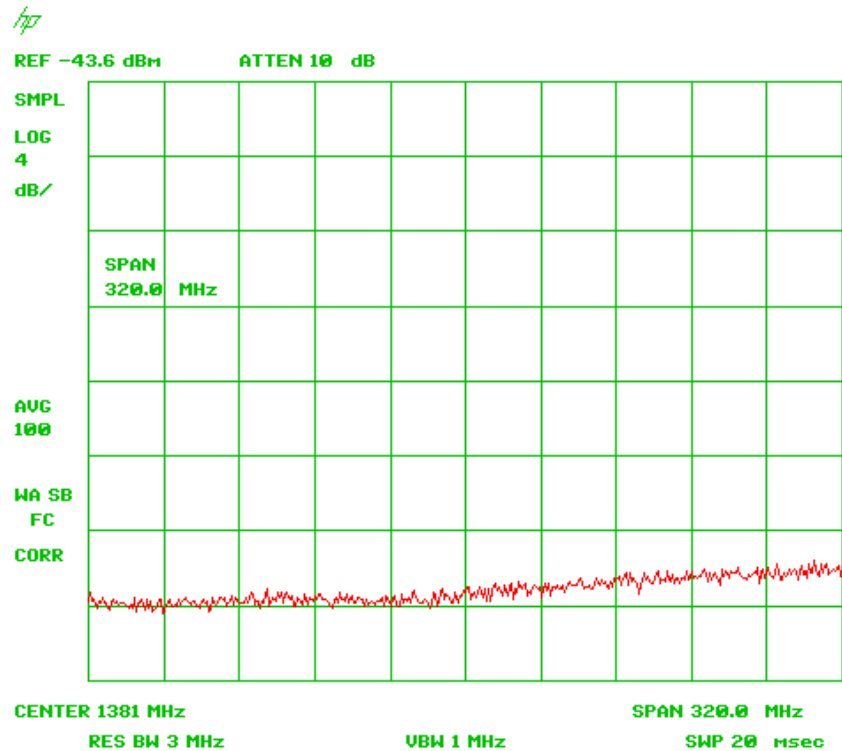
6.1 Kohinapohja

Jos spektrianalysaattorin oma kohinataso on lähellä signaalin kohinatasoa, aiheuttaa se mittausvirhettä. Ongelman poistamiseksi signaalia vahvistettiin ennen sen viemistä spektrianalysaattorille, jotta kohinatasot saataisiin selvästi erotettua toisistaan. Spektrianalysaattorin oma kohinataso nähtiin irrottamalla signaali analysaattorista. Kuvasta 8 nähdään spektrianalysaattorin kohinataso C/N-mittauksen asetuksilla.



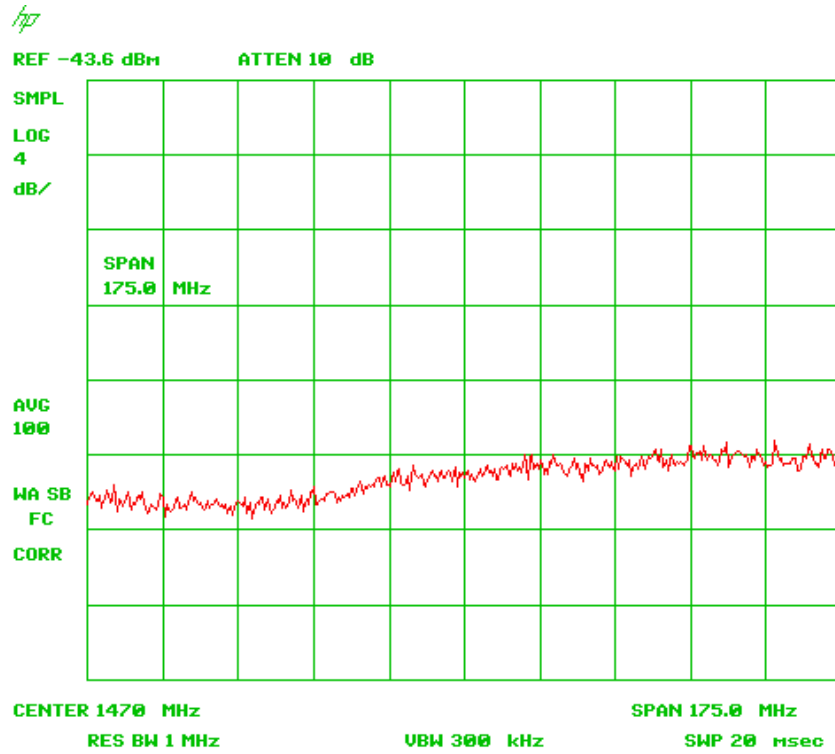
Kuva 8. Spektrianalysaattorin kohinataso C/N-mittauksen asetuksilla.

Spektrianalysoijan kohinataso muuttuu, kun kaistanleveyttä nostetaan, joten haluttiin myös selvittää spektrianalysoijan kohinataso Spot 70:n transponderin kaistanleveydellä. Transponderimittauksissa käytettiin 320 MHz:n SPANia, jonka kohinataso nähdään kuvasta 9.

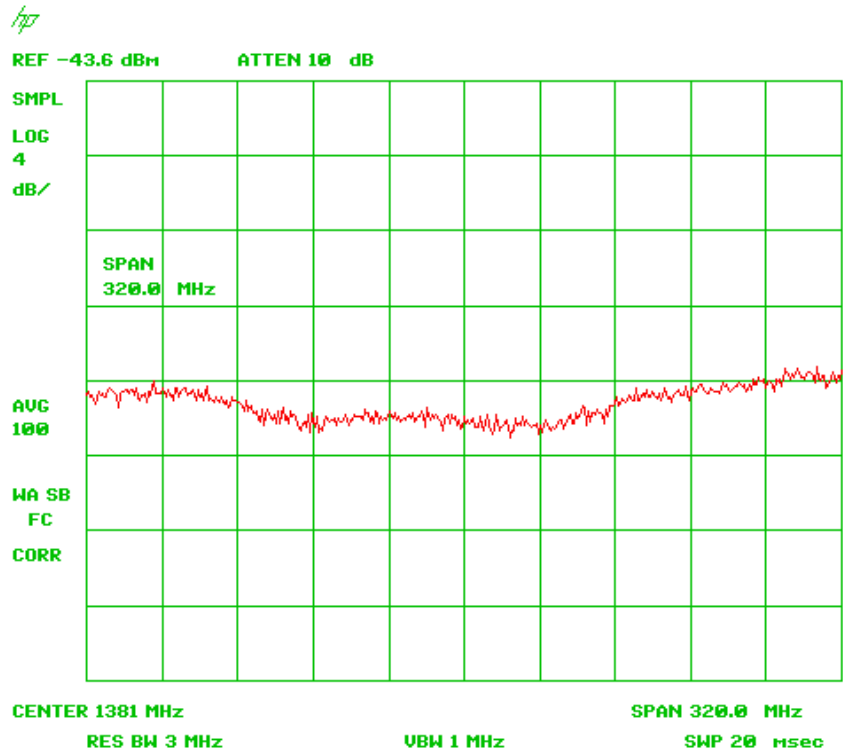


Kuva 9. Spektrianalysoijan kohinataso 320 MHz:n SPANilla.

Terminaalin systeemikohina voidaan mitata kääntämällä antennia satelliitin ohi. Antennia käännettiin elevaatioissa ylöspäin n. 5°, jolloin antennin keila ei enää vastaanota lähetettä ja spektrissä näkyy vain kohinapohja. Kuvasta 10 nähdään kohinapohja C/N-mittauksen parametreilla. Kuvassa 11 on systeemikohina transponderimittauksen asetuksilla.



Kuva 10. Systeemikohina C/N-mittauksen parametreilla.



Kuva 11. Systeemikohina transponderimittauksen asetuksilla.

6.2 C/N

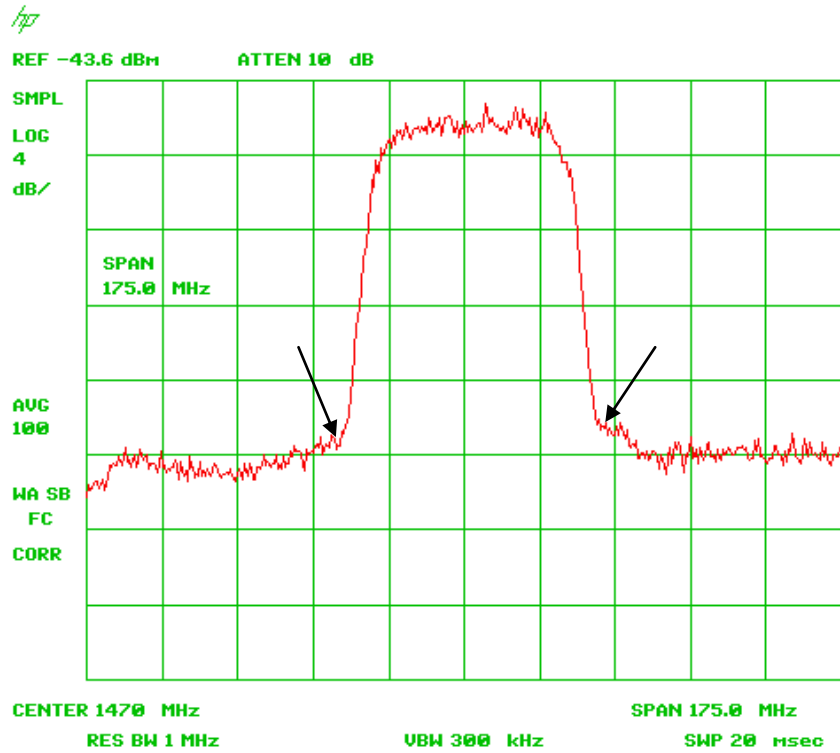
C/N eli Carrier to Noise on tavallinen ilmaisutapa signaalin vahvuudelle. Jotta signaali voitaisiin erottaa kohinan seasta, on signaalin ja kohinan välillä oltava riittävästi amplitudiero. Mitä suurempi C/N arvo on, sitä suurempi amplitudiero on kohinan ja lähetteen välillä.

C/N-mittaukset suoritettiin seuraavilla asetuksilla:

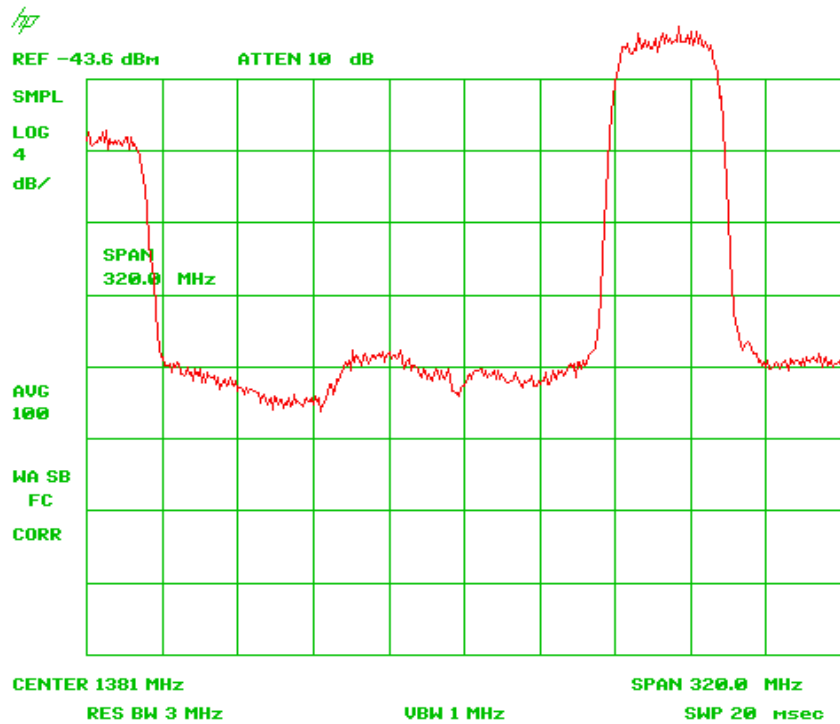
- RBW: 1 MHz
- VBW: 300 kHz
- Center frequency: 1470 MHz
- Span: 175 MHz
- Avg: 100
- Attenuation: 10 dB.

Lähetteen kohinatason määrittäminen on spektrianalysaattorilla haastavaa. Mittauspisteiksi kohinatasolle valittiin kuitenkin kohdat, jossa kantoaalto alkaa selvästi taittumaan. Mittauspisteiden taajuudet ovat 1,4407 GHz ja 1,5016 GHz. Kuvasta 12 nähdään kohinatason mittauspisteet nuolilla merkittyinä. Kantoaalton tasoksi valittiin lähetteen keskikohta taajuudella 1,470 GHz.

Lähetettä tarkasteltiin myös suuremmalla SPANilla, jotta nähtiin Spot 70:n transponderin reunataajuudet. Kuvassa 13 nähdään lähete ja kohinataso 320 MHz SPANilla. Kuvan vasemmassa reunassa näkyy myös osa Spot 76:n lähetettä.



Kuva 12. Kohinatason mittauspisteet.

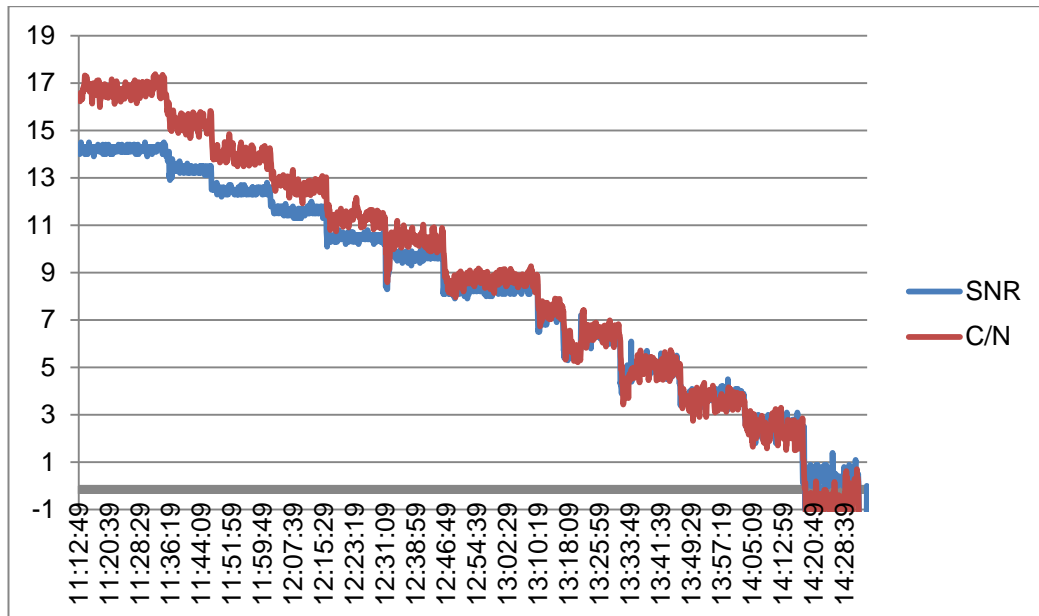


Kuva 13. Lähete ja kohinataso 320 MHz SPANilla.

6.3 C/N:n ja SNR:n vastaavuus

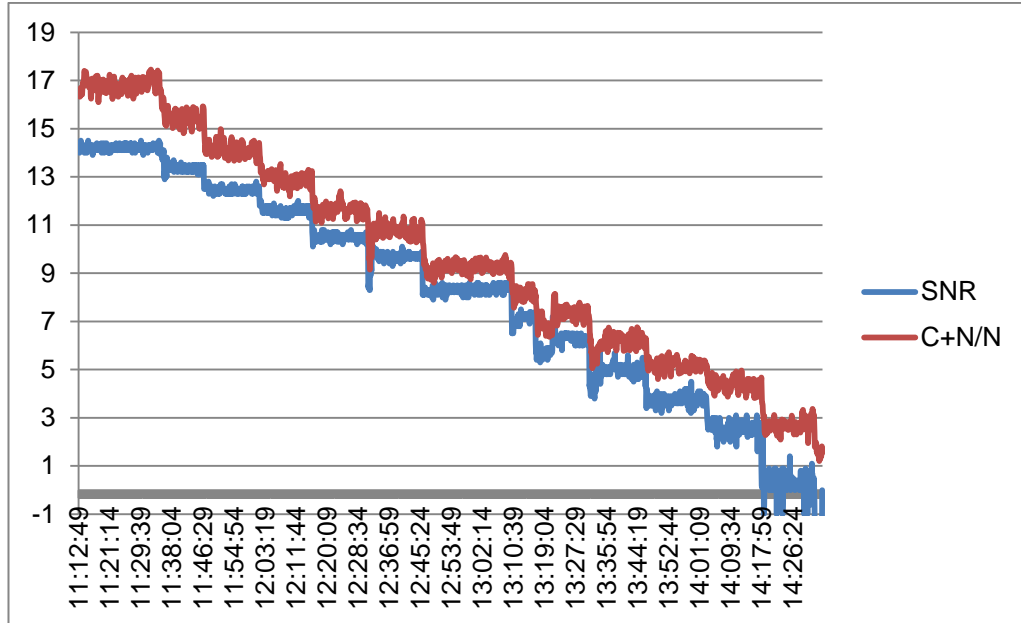
Yhtenä C/N-mittausten tarkoituksena oli selvittää, miten spektrianalysaattorin C/N ja modeemin SNR muuttuvat toisiinsa nähden. Samalla haluttiin myös nähdä, miten OSS:n ilmoittama SNR eroaa mitatuista arvoista. Olennaista oli myös selvittää lataus- ja lähetyksenopeuden muuttuminen ajan funktiona.

Mittausten tekemiseen signaalin tasoa oli tasaisesti pudotettava. Helppo tapa saada signaali heikkenemään oli suunnata antennia satelliitin yli noin 1 dB:n askelin. Kuvioista 2 nähdään C/N ja SNR käyttäytyminen toisiinsa nähden ajan funktiona.



Kuvio 2. C/N (dB) ja SNR (dB) ajan funktiona (hh:mm:ss).

Kuviosta 3 nähdään C+N/N eli signaali-kohinasuhde spektrianalysaattorista ilman kohinakorjausta. Kohinakorjauksen merkitys on huomattava, kun C+N/N putoaa 3 dB tasolle, jolloin C/N on todellisuudessa 0 dB.



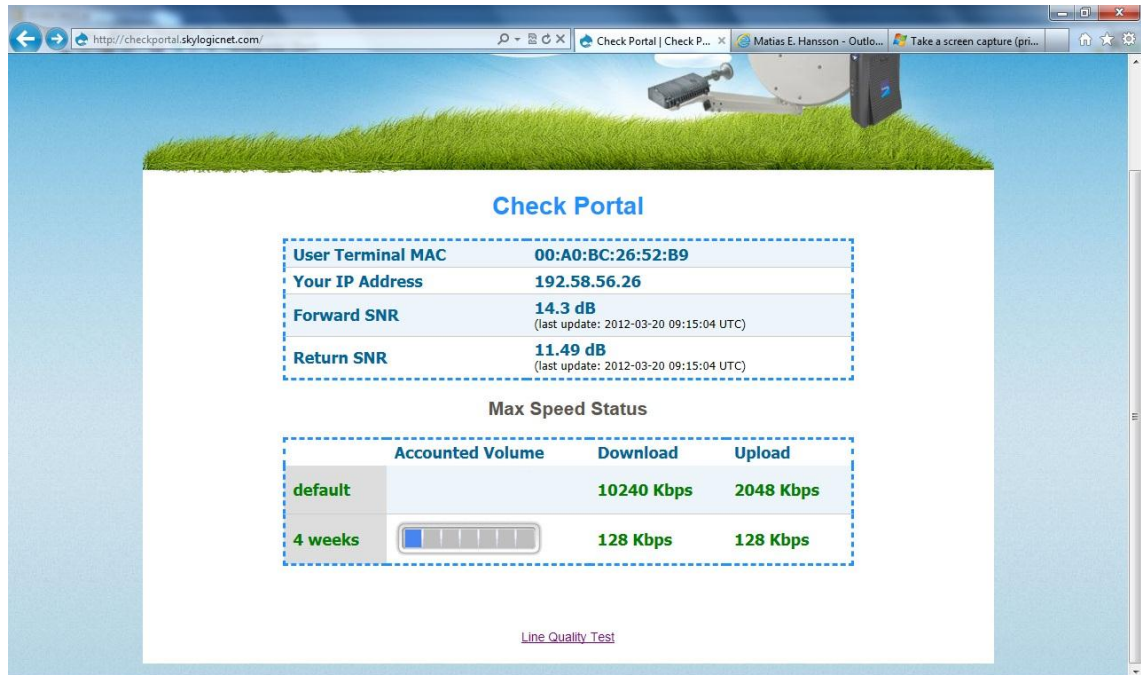
Kuvio 3. C+N/N (dB) ja SNR (dB) ajan funktiona (hh:mm:ss).

6.4 Check Portal ja nopeustestit

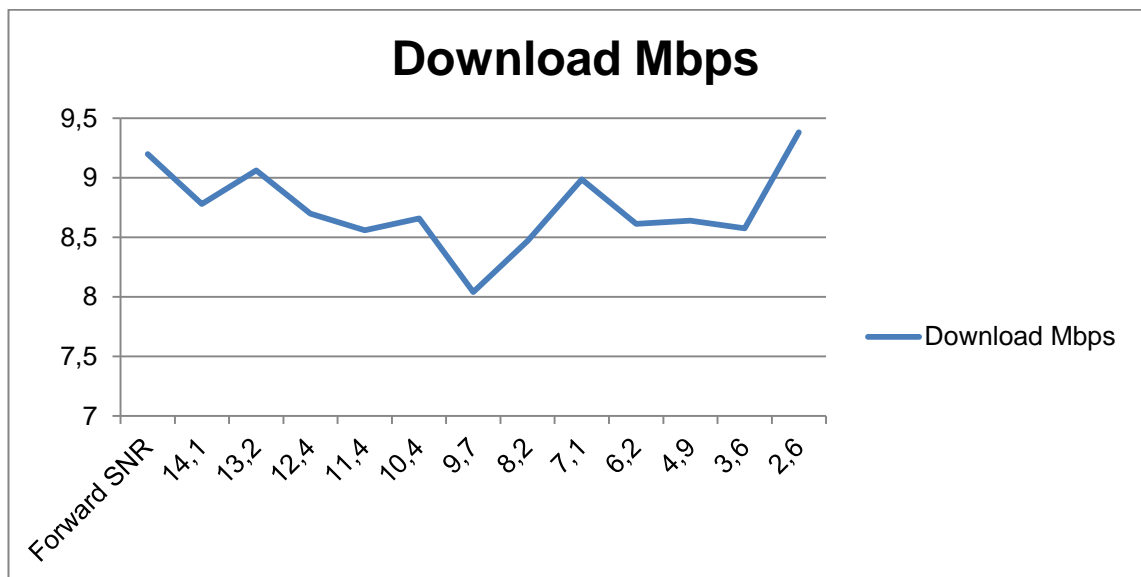
Check Portal on Skylogicin palvelu satelliittilaajakaista-asiakkaille, ja sieltä näkyy kuukaudessa siirretyn datan määrä, SNR-tasot Forward- ja Return-linkille, sekä yhteyden nopeus nopeustestillä (kuva 14). Nopeustestiä verrattiin latausnopeuden osalta lataamalla null-tiedosto osoitteesta <ftp://ftp.funet.fi/dev>. Latausnopeuden osalta nopeustesti todettiin luotettavaksi.

Kuten kuvasta 15 nähdään, ei signaali/kohinatason putoaminen vaikuta mitenkään latausnopeuteen. Kun SNR putosi noin -1 dB:n tasolle, yhteys katkesi kokonaan. Tästä poiketen lähetysnopeus romahti signaalin heikkenemisen myötä, mikä myös näkyi huonontuneessa käytettävyydessä. Kuvassa 16 lähetysnopeus Return SNR –luvun funktiona.

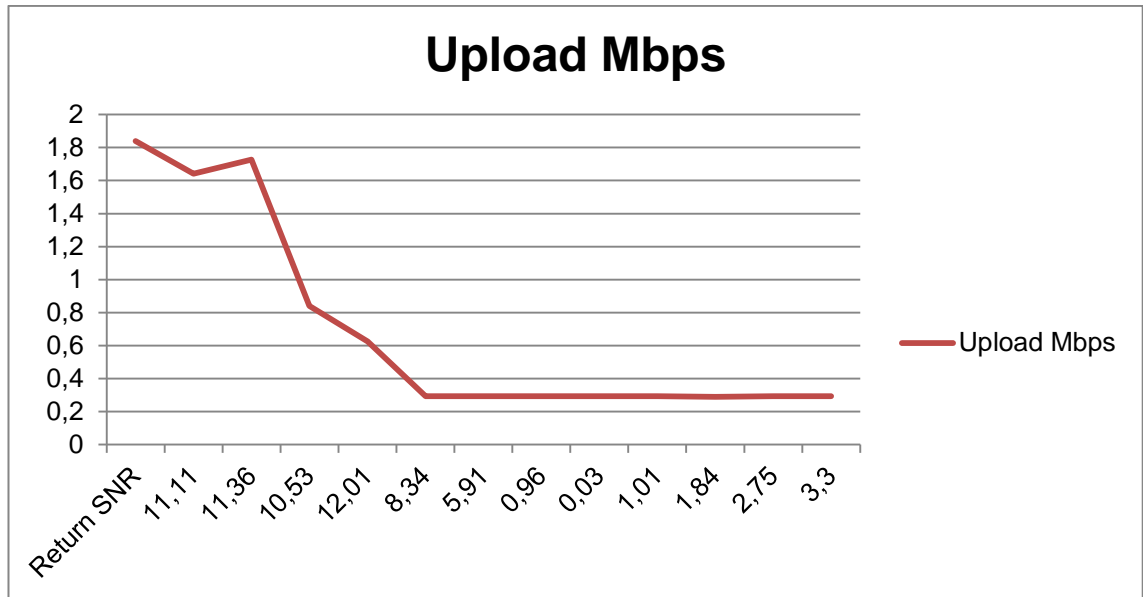
Tulosten perusteella voidaan todeta, että vianhallinnassa voidaan käyttää modeemin ilmoittamia arvoja kun arvioidaan signaalivahvuutta.



Kuva 14. Check portal.



Kuva 15. Latausnopeus SNR-luvun funktiona.



Kuva 16. Lähetyksenopeus SNR-luvun funktiona.

7 TULOKSET JA NIIDEN VERTAAMINEN LINKKIBUDJETTILASKUIHIN

Mittausten perusteella yhteyden C/N_{Total} on kirkkaalla kelillä noin 17-18 dB. Tämä lukema on odotusten mukainen ja samanlaisia tuloksia on saatu myös muista spoteista [5].

Linkkibudjettilaskut päätettiin laskea Excel-taulukon avulla. Laskuissa käytettiin kappaleen 3 ja 4 laskukaavoja. Mittausten ja laskettujen arvojen perusteella voidaan todeta, että yhteys on ns. downlink-rajoitteinen, koska teoreettinen C/N_{Downlink} maksimiarvo on alle 20 dB. Jos jokin interferenssi olisi samaa luokkaa, olisi C/N_{total} monta desibeliä pienempi.

Ilmakehän vaimennusten osalta ei saatu tehtyä luotettavia mittauksia ja vertailuja, koska työn suorittamisen aikana sateet olivat hyvin heikkoja eikä huomattavaa vaimennusta tapahtunut. Laskujen perusteella voidaan kuitenkin todeta, että matalan korotuskulman alueilla ilmakehän vaikutukset ovat huomattavasti suuremmat kuin korkean korotuskulman alueella.

7.1 Kirkkaankelin C/N

Tässä kappaleessa on laskettuna linkkibudjettilaskelma kolmelle eri sijainnille ja elevaatiolle Suomessa. Turku, Oulu ja Utsjoki ovat valitut sijainnit, koska niissä on mahdollisimman suuri elevaatiovaihtelu. Laskuissa tarkastellaan vain satelliitin ja asiakasterminaalin välistä osuutta. Laskuissa on otettu huomioon sekä lähetys- että vastaanottosuunnat.

7.1.1 Downlink

Turku

- EIRP: 61 dBW
- taajuus f_D : 19,75 GHz
- antennin halkaisija D : 0,75 m
- antennin hyötysuhde η : 65 %
- satelliitin ja asiakasterminaalin välinen etäisyys R : 39 500 km
- ilmakehän vaimennus L_A : 1 dB
- vapaan tilan vaimennus L_{FS} : 210,3 dB
- vastaanottimen kohinaluku F : 1 dB
- antennin ja vastaanottimen väliset häviöt L_{FRX} : 0,5 dB
- Maximum Pointing Error θ_R : 0,1°
- maaperän kohinalämpötila T_G : 20 K [8, s.212]
- taivaan kohinalämpötila T_{Sky} : 45 K [8, s.213]
- syötön termodynaaminen lämpötila T_F : 290 K
- $T_0 = 290$ K.

Siirtotien vaimennus $L_D = 210,3 \text{ dB} + 1 \text{ dB} = 211,3 \text{ dB}$

$G_{RMax} = 0,6[(\pi \times 0,75 \times 19,75 \times 10^9) / 3 \times 10^8]^2 = 41,94 \text{ dBi}$ (Tämä tulos on liian suuri, joten käytetään Eutelsatin ilmoittamaa vahvistusta 40,1 dBi [3])

$L_R = 12[(0,1 \times 0,75 \times 19,75 \times 10^9) / 70 \times 3 \times 10^8] = 0,06 \text{ dB}$

$T_A = 20 \text{ K} + 45 \text{ K} = 65 \text{ K}$

$T_{eRx} = (10^{0,1} - 1)290 \text{ K} = 75 \text{ K}$

$T_D = 65 / 10^{0,05} + 290(1 - 1/10^{0,05}) + 75 = 165 \text{ K}$

$G/T = 40,1 - 0,06 - 0,5 - 10 \log(165) = 17,36 \text{ dBK}^{-1}$

$C/N_{Downlink} = 61 \text{ dBW} - 211,3 \text{ dB} + 17,36 \text{ dBK}^{-1} + 228,6 \text{ dBW/HzK} - 10 \log(50 \times 10^6) = \mathbf{18,7 \text{ dB}}$

Oulu

- EIRP: 55 dBW
- taajuus f_D : 19,75 GHz
- antennin halkaisija D : 0,75 m
- antennin hyötysuhde η : 65 %
- satelliitin ja asiakasterminaalien välinen etäisyys R : 40 000 km
- ilmakehän vaimennus L_A : 1,4 dB
- vapaan tilan vaimennus L_{FS} : 210,4 dB
- vastaanottimen kohinaluku F : 1 dB
- antennin ja vastaanottimen väliset häviöt L_{FRX} : 0,5 dB
- Maximum Pointing Error θ_R : 0,1°
- maaperän kohinalämpötila T_G : 20 K [8, s.212]
- taivaan kohinalämpötila T_{Sky} : 60 K [8, s.213]
- syötön termodynaaminen lämpötila T_F : 290 K
- $T_0 = 290$ K.

Siirtotien vaimennus $L_D = 210,4 \text{ dB} + 1,4 \text{ dB} = 211,8 \text{ dB}$

$G_{RMax} = 40,1 \text{ dBi}$ [3]

$L_R = 0,06 \text{ dB}$

$T_A = 20 \text{ K} + 60 \text{ K} = 80 \text{ K}$

$T_{eRx} = (10^{0,1} - 1)290\text{K} = 75 \text{ K}$

$T_D = 80/10^{0,0,5} + 290(1 - 1/10^{0,05}) + 75 = 178 \text{ K}$

$G/T = 40,1 - 0,06 - 0,5 - 10 \log(178) = 17,0 \text{ dBK}^{-1}$

$C/N_{Downlink} = 57 \text{ dBW} - 211,8 \text{ dB} + 17 \text{ dBK}^{-1} + 228,6 \text{ dBW/HzK} - 10\log(50 \times 10^6)$
= 13,8 dB

Utsjoki

- EIRP: 50 dBW
- taajuus f_D : 19,75 GHz

- antennin halkaisija D : 1,2 m
- antennin hyötysuhde η : 70 %
- satelliitin ja asiakasterminaalien välinen etäisyys R : 40 600 km
- ilmakehän vaimennus L_A : 2,0 dB
- vapaan tilan vaimennus L_{FS} : 210,5 dB
- vastaanottimen kohinaluku F : 1 dB
- antennin ja vastaanottimen väliset häviöt L_{FRX} : 0,5 dB
- Maximum Pointing Error θ_R : 0,1°
- maaperän kohinalämpötila T_G : 20 K [8, s.212]
- taivaan kohinalämpötila T_{Sky} : 80 K [8, s.213]
- syötön termodynaaminen lämpötila T_F : 290 K
- $T_0 = 290$ K.

Siirtotien vaimennus $L_D = 210,5 \text{ dB} + 2,0 \text{ dB} = 212,5 \text{ dB}$

$G_{RMax} = 0,7[(\pi \times 1,2 \times 19,75 \times 10^9) / 3 \times 10^8]^2 = 46,35 \text{ dBi}$ (Eutelsatin ilmoittama vahvistus on 46.5 dBi [3])

$L_R = 0,06 \text{ dB}$

$T_A = 20 \text{ K} + 60 \text{ K} = 100 \text{ K}$

$T_{eRx} = (10^{0,1} - 1)290 \text{ K} = 75 \text{ K}$

$T_D = 100/10^{0,05} + 290(1 - 1/10^{0,05}) + 75 = 195 \text{ K}$

$G/T = 46,5 - 0,06 - 0,5 - 10 \log(195) = 23,0 \text{ dBK}^{-1}$

$C/N_{Downlink} = 52 \text{ dBW} - 212,5 \text{ dB} + 23 \text{ dBK}^{-1} + 228,6 \text{ dBW/HzK} - 10 \log(50 \times 10^6)$
= 14,1 dB

7.1.2 Uplink

Turku

- VSAT Antennin halkaisija D : 0,75 m

- antennin hyötysuhde η : 65 %
- lähetysteho P_{TX} : 3 W
- vahvistimen ja antennin väliset häviöt L_{FTX} : 0,5 dB
- Maximum Pointing Error θ_R : 0,1°

- taajuus f_D : 29,75 GHz
- asiakasterminaalien ja satelliitin välinen etäisyys R : 39 500 km
- ilmakehän vaimennus L_A : 1,37 dB
- vapaan tilan vaimennus L_{FS} : 213,8 dB

- KA-SAT antennin halkaisija D : 2,6 m [5]
- antennin hyötysuhde η : 65 %
- vastaanottimen kohinaluku F : 3 dB
- antennin ja vastaanottimen väliset häviöt L_{FRX} : 0,5 dB
- Maximum Pointing Error θ_R : 0,06°
- maaperän kohinalämpötila T_G : 290 K [8, s.212]
- taivaan kohinalämpötila T_{sky} : 5 K [8, s.213]
- syötön termodynaaminen lämpötila T_F : 290 K
- $T_0 = 290$ K

Siirtotien vaimennus $L_U = 213,8 \text{ dB} + 1,37 \text{ dB} = 215,2 \text{ dB}$

$P_{TX} = 3 \text{ W} = 4,8 \text{ dBW}$

$G_{Tmax} = 0,65[(\pi \times 0,75 \times 29,75 \times 10^9) / 3 \times 10^8]^2 = 45,2 \text{ dBi}$ (Eutelsatin ilmoittama vahvistus Toowayn antennille lähetyssuunnassa on 44,2 dBi [3])

$L_T = 12[(0,1 \times 0,75 \times 29,75 \times 10^9) / 70 \times 3 \times 10^8] = 0,14 \text{ dB}$

$EIRP_{VSAT} = 4,8 \text{ dB} + 44,2 \text{ dB} - 0,14 \text{ dB} - 0,5 \text{ dB} = 48,36 \text{ dBW}$

$G_{RMax} = 0,65[(\pi \times 2,6 \times 29,75 \times 10^9) / 3 \times 10^8]^2 = 56,3 \text{ dBi}$

$L_R = 12[(0,06 \times 2,6 \times 29,75 \times 10^9) / 70 \times 3 \times 10^8] = 0,6 \text{ dB}$

$T_{eRx} = (10^{0,3} - 1)290 \text{ K} = 290 \text{ K}$

$$T_A = 290 \text{ K} + 5 \text{ K} = 295 \text{ K}$$

$$T_D = 295/10^{0,05} + 290(1 - 1/10^{0,05}) + 290 = 583 \text{ K}$$

$$(G/T)_{KA-SAT} = 56,3 \text{ dBi} - 0,6 \text{ dB} - 0,5 - 10\log(583) = 27,5 \text{ dBK}^{-1}$$

$$C/N_{Uplink} = 48,36 \text{ dBW} - 215,2 \text{ dB} + 27,5 \text{ dBK}^{-1} + 228,6 \text{ dBW/HzK} - 10\log(50 \times 10^6) = \mathbf{12,3 \text{ dB}}$$

Oulu

- VSAT Antennin halkaisija D: 0,75 m
- antennin hyötysuhde η : 65 %
- lähetysteho P_{TX} : 3 W
- vahvistimen ja antennin väliset häviöt L_{FTX} : 0,5 dB
- maximum pointing error θ_R : 0,1°

- taajuus f_D : 29,75 GHz
- asiakasterminaalien ja satelliitin välinen etäisyys R: 40 000 km
- ilmakehän vaimennus L_A : 1,84 dB
- vapaan tilan vaimennus L_{FS} : 213,95 dB

- KA-SAT antennin halkaisija D: 2,6 m [5]
- antennin hyötysuhde η : 65 %
- vastaanottimen kohinaluku F: 3 dB
- antennin ja vastaanottimen väliset häviöt L_{FRX} : 0,5 dB
- Maximum Pointing Error θ_R : 0,1°
- maaperän kohinalämpötila T_G : 290 K [8, s.212]
- taivaan kohinalämpötila T_{sky} : 5 K [8, s.213]
- syötön termodynaaminen lämpötila T_F : 290 K
- $T_0 = 290 \text{ K}$.

$$\text{Siirtotien vaimennus } L_U = 213,95 \text{ dB} + 1,84 \text{ dB} = 215,8 \text{ dB}$$

$$P_{TX} = 3 \text{ W} = 4,8 \text{ dBW}$$

$G_{Tmax} = 0,65[(\pi \times 0,75 \times 29,75 \times 10^9) / 3 \times 10^8]^2 = 45,2 \text{ dBi}$ (Eutelsatin ilmoittama vahvistus Toowayn antennille lähetyssuunnassa on 44,2 dBi [3])

$$L_T = 12[(0,1 \times 0,75 \times 29,75 \times 10^9) / 70 \times 3 \times 10^8] = 0,14 \text{ dB}$$

$$EIRP_{VSAT} = 4,8 \text{ dB} + 44,2 \text{ dB} - 0,14 \text{ dB} - 0,5 \text{ dB} = 48,36 \text{ dBW}$$

$$G_{RMax} = 0,65[(\pi \times 2,6 \times 29,75 \times 10^9) / 3 \times 10^8]^2 = 56,3 \text{ dBi}$$

$$L_R = 12[(0,1 \times 2,6 \times 29,75 \times 10^9) / 70 \times 3 \times 10^8] = 1,6 \text{ dB}$$

$$T_{eRx} = (10^{0,3} - 1)290 \text{ K} = 290 \text{ K}$$

$$T_A = 290 \text{ K} + 5 \text{ K} = 295 \text{ K}$$

$$T_D = 295/10^{0,05} + 290(1 - 1/10^{0,05}) + 290 = 583 \text{ K}$$

$$(G/T)_{KA-SAT} = 56,3 \text{ dBi} - 1,6 \text{ dB} - 0,5 - 10\log(583) = 26,5 \text{ dBK}^{-1}$$

$$C/N_{Uplink} = 48,36 \text{ dBW} - 215,8 \text{ dB} + 26,5 \text{ dBK}^{-1} + 228,6 \text{ dBW/HzK} - 10\log(50 \times 10^6) = \mathbf{10,7 \text{ dB}}$$

Utsjoki

- VSAT Antennin halkaisija D: 1,2 m
- antennin hyötysuhde η : 65 %
- lähetysteho P_{TX} : 3 W
- vahvistimen ja antennin väliset häviöt L_{FTX} : 0,5 dB
- taajuus f_D : 29,75 GHz
- asiakasterminaalien ja satelliitin välinen etäisyys R: 40 600 km
- ilmakehän vaimennus L_A : 2,75 dB
- vapaan tilan vaimennus L_{FS} : 214,1 dB
- Maximum Pointing Error θ_R : 0,15°
- KA-SAT antennin halkaisija D: 2,6 m [5]
- antennin hyötysuhde η : 65 %

- vastaanottimen kohinaluku F : 3 dB
- antennin ja vastaanottimen väliset häviöt L_{FRX} : 0,5 dB
- Maximum Pointing Error θ_R : 0,2°
- maaperän kohinalämpötila T_G : 290 K [8, s.212]
- taivaan kohinalämpötila T_{Sky} : 5 K [8, s.213]
- syötön termodynaaminen lämpötila T_F : 290 K
- $T_0 = 290$ K.

Siirtotien vaimennus $L_U = 214,1$ dB + 2,75 dB = 216,85 dB

$P_{TX} = 3$ W = 4,8 dBW

$G_{Tmax} = 0,65[(\pi \times 1,2 \times 29,75 \times 10^9) / 3 \times 10^8]^2 = 49,6$ dBi (sama kuin Eutelsatin ilmoittama vahvistus lähetyssuunnassa [3])

$L_T = 12[(0,15 \times 1,2 \times 29,75 \times 10^9) / 70 \times 3 \times 10^8] = 0,78$ dB

$EIRP_{VSAT} = 4,8$ dB + 49,6 dB - 0,78 dB - 0,5 dB = 53,1 dBW

$G_{RMax} = 0,65[(\pi \times 2,6 \times 29,75 \times 10^9) / 3 \times 10^8]^2 = 56,3$ dBi

$L_R = 12[(0,2 \times 2,6 \times 29,75 \times 10^9) / 70 \times 3 \times 10^8] = 6,5$ dB

$T_{eRx} = (10^{0,3} - 1)290$ K = 290 K

$T_A = 290$ K + 5 K = 295 K

$T_D = 295/10^{0,05} + 290(1 - 1/10^{0,05}) + 290 = 583$ K

$(G/T)_{KA-SAT} = 56,3$ dBi - 6,5 dB - 0,5 - 10log(583) = 21,6 dBK⁻¹

$C/N_{Uplink} = 53,1$ dBW - 216,85 dB + 21,6 dBK⁻¹ + 228,6 dBW/HzK - 10log(50x10⁶) = **9,46 dB**

7.2 C/N sadevaimennuksen aikana

Tässä kappaleessa on laskettuna sadevaimennuksen vaikutus edellä oleviin linkkibudjettilaskuihin. Laskuissa tarkastellaan vain satelliitin ja asiakastermi-

naalin välistä osuutta. Laskuissa on otettu huomioon sekä lähetys- että vastaanottosuunnat.

7.2.1 Downlink

Downlinkillä vaimennuksen lisäksi myös antennin kohinalämpötila kasvaa sateen vaikutuksesta, mikä heikentää antennin G/T:tä ja siten myös C/N:ää ja SNR:ää. Antennin kohinalämpötilan kasvu saadaan laskettua kaavalla

$$T_A = T_{\text{Sky}}/A_{\text{RAIN}} + T_m(1-1/A_{\text{RAIN}}) + T_{\text{Ground}}, \quad (73)$$

missä

T_m = vesimassan lämpötila (oletetaan olevan 275 K)

A_{Rain} = sateen aiheuttama vaimennus.

Turku

Keskimääräinen sadeintensiteetti Turussa 0,01 % ajasta on 25 mm/h [17]. Valitaan sadeintensiteetiksi 25 mm/h. Vaimennuskerroin ja efektiivinen etenemistien pituus lasketaan kaavoilla luvusta 4.4. Muille aikaprocenteille sadevaimennus lasketaan kaavalla 70 sivulla 24.

Vaimennuskerroin $\gamma_R = 2,35$ dB/km

Efektiivinen etenemistien pituus $L_E = 3,74$ km

$A_{\text{Rain}0,01\%} = 2,35$ dB/km \times 3,74 km = 8,79 dB

Siirtotien vaimennus $L_A = 211,3$ dB + 8,79 dB = 220,1 dB

Antennin kohinalämpötila $T_A = 45/10^{0,879} + 275(1-1/10^{0,879}) + 20 = 265$ K

$T_{D0,01\%} = 342$ K

$(G/T)_{0,01\%} = 40,1 - 0,06 - 0,5 - 10 \log(342) = 14,2$ dBK⁻¹

$$C/N_{\text{Downlink}0,01\%} = 61 \text{ dBW} - 220,1 \text{ dB} + 14,2 \text{ dBK}^{-1} + 228,6 \text{ dBW/HzK} - 10\log(50 \times 10^6) = \mathbf{6,7 \text{ dB}}$$

Seuraavaksi lasketaan sadevaimennus ja C/N muille aikaprosenteille.

$$A_{\text{Rain}0,1\%} = 3,3 \text{ dB}$$

$$(G/T)_{0,1\%} = 40,1 - 0,06 - 0,05 - 10 \log(274) = 15,2 \text{ dBK}^{-1}$$

$$C/N_{\text{Downlink}0,1\%} = 61 \text{ dBW} - 214,6 \text{ dB} + 15,2 \text{ dBK}^{-1} + 228,6 \text{ dBW/HzK} - 10\log(50 \times 10^6) = \mathbf{13,2 \text{ dB}}$$

$$A_{\text{Rain}1,0\%} = 0,67 \text{ dB}$$

$$(G/T)_{1,0\%} = 40,1 - 0,06 - 0,05 - 10 \log(194) = 16,6 \text{ dBK}^{-1}$$

$$C/N_{\text{Downlink}1,0\%} = 61 \text{ dBW} - 211,97 \text{ dB} + 16,6 \text{ dBK}^{-1} + 228,6 \text{ dBW/HzK} - 10\log(50 \times 10^6) = \mathbf{17,2 \text{ dB}}$$

$$C/N_{\text{Downlink}2,0\%} = \mathbf{18,4 \text{ dB}}$$

Oulu

Keskimääräinen sadeintensiteetti Oulussa 0,01 % ajasta on 20 mm/h [17]. Valitaan sadeintensiteetiksi 20 mm/h.

$$\text{Vaimennuskerroin } \gamma_R = 1,85 \text{ dB/km}$$

$$\text{Efektiivinen etenemistien pituus } L_E = 4,74 \text{ km}$$

$$A_{\text{Rain}0,01\%} = 1,85 \text{ dB/km} \times 4,7 \text{ km} = 8,76 \text{ dB}$$

$$\text{Siirtotien vaimennus } L_A = 211,8 \text{ dB} + 8,76 \text{ dB} = 220,6 \text{ dB}$$

$$\text{Antennin kohinalämpötila } T_A = 60/10^{0,876} + 275(1-1/10^{0,876}) + 20 = 264 \text{ K}$$

$$T_D = 342 \text{ K}$$

$$(G/T)_{0,01\%} = 40,1 - 0,06 - 0,5 - 10 \log(342) = 14,2 \text{ dBK}^{-1}$$

$$C/N_{\text{Downlink}0,01\%} = 57 \text{ dBW} - 220,6 \text{ dB} + 14,2 \text{ dBK}^{-1} + 228,6 \text{ dBW/HzK} - 10\log(50 \times 10^6) = \mathbf{2,2 \text{ dB}}$$

$$A_{\text{Rain}0,1\%} = 3,9 \text{ dB}$$

$$(G/T)_{0,1\%} = 40,1 - 0,06 - 0,5 - 10 \log(291) = 14,9 \text{ dBK}^{-1}$$

$$C/N_{\text{Downlink}0,1\%} = 57 \text{ dBW} - 215,74 \text{ dB} + 14,9 \text{ dBK}^{-1} + 228,6 \text{ dBW/HzK} - 10\log(50 \times 10^6) = \mathbf{7,5 \text{ dB}}$$

$$A_{\text{Rain}1,0\%} = 0,67 \text{ dB}$$

$$(G/T)_{1,0\%} = 40,1 - 0,06 - 0,5 - 10 \log(205) = 16,42 \text{ dBK}^{-1}$$

$$C/N_{\text{Downlink}1,0\%} = 57 \text{ dBW} - 212,51 \text{ dB} + 16,42 \text{ dBK}^{-1} + 228,6 \text{ dBW/HzK} - 10\log(50 \times 10^6) = \mathbf{12,52 \text{ dB}}$$

$$C/N_{\text{Downlink}2,0\%} = \mathbf{13,0 \text{ dB}}$$

Utsjoki

Keskimääräinen sadeintensiteetti Utsjoella 0,01 % ajasta on 20 mm/h [17]. Valitaan sadeintensiteetiksi 20 mm/h.

$$\text{Vaimennuskerroin } \gamma_R = 1,85 \text{ dB/km}$$

$$\text{Efektiivinen etenemistien pituus } L_E = 6,0 \text{ km}$$

$$A_{\text{Rain}0,01} = 1,85 \text{ dB/km} \times 6,0 \text{ km} = 11,2 \text{ dB}$$

$$\text{Siirtotien vaimennus } L_A = 212,5 \text{ dB} + 11,2 \text{ dB} = 223,7 \text{ dB}$$

$$\text{Antennin kohinalämpötila } T_A = 80/10^{1,12} + 275(1-1/10^{1,12}) + 20 = 278 \text{ K}$$

$$T_D = 354 \text{ K}$$

$$(G/T)_{0,01\%} = 46,5 - 0,06 - 0,5 - 10 \log(354) = 20,4 \text{ dBK}^{-1}$$

$$C/N_{\text{Downlink}0,01\%} = 52 \text{ dBW} - 223,7 \text{ dB} + 20,4 \text{ dBK}^{-1} + 228,6 \text{ dBW/HzK} - 10\log(50 \times 10^6) = \mathbf{0,31 \text{ dB}}$$

$$A_{\text{Rain}0,1\%} = 5,35 \text{ dB}$$

$$(G/T)_{0,1\%} = 46,5 - 0,06 - 0,5 - 10 \log(318) = 20,9 \text{ dBK}^{-1}$$

$$C/N_{\text{Downlink0,1\%}} = 52 \text{ dBW} - 217,85 \text{ dB} + 20,9 \text{ dBK}^{-1} + 228,6 \text{ dBW/HzK} - 10\log(50 \times 10^6) = \mathbf{6,66 \text{ dB}}$$

$$A_{\text{Rain1,0\%}} = 0,9 \text{ dB}$$

$$(G/T)_{1,0\%} = 46,5 - 0,06 - 0,5 - 10 \log(228) = 22,36 \text{ dBK}^{-1}$$

$$C/N_{\text{Downlink1,0\%}} = 52 \text{ dBW} - 213,4 \text{ dB} + 22,36 \text{ dBK}^{-1} + 228,6 \text{ dBW/HzK} - 10\log(50 \times 10^6) = \mathbf{12,57 \text{ dB}}$$

$$C/N_{\text{Downlink2,0\%}} = \mathbf{13,24 \text{ dB}}$$

7.2.2 Uplink

Uplinkin tapauksessa sadevaimennuksen osalta ei tarvitse ottaa huomioon kohinalämpötilan nousua. Sateen vaikutus lasketaan vähentämällä kirkaankelin C/N-arvosta sateen aiheuttama vaimennus.

Turku

$$\text{Vaimennuskerroin } \gamma_R = 4,58 \text{ dB/km}$$

$$\text{Efektiivinen etenemistien pituus } L_E = 3,05 \text{ km}$$

$$A_{\text{Rain0,01\%}} = 4,58 \text{ dB/km} \times 3,05 \text{ km} = 14,0 \text{ dB}$$

$$\text{Siirtotien vaimennus } L_A = 215,2 \text{ dB} + 14,0 \text{ dB} = 229,2 \text{ dB}$$

$$C/N_{\text{Uplink0,01\%}} = 48,36 \text{ dBW} - 229,2 \text{ dB} + 27,5 \text{ dBK}^{-1} + 228,6 \text{ dBW/HzK} - 10\log(50 \times 10^6) = \mathbf{-1,73 \text{ dB}}$$

$$A_{\text{Rain0,1\%}} = 5,58 \text{ dB}$$

$$C/N_{\text{Uplink0,1\%}} = \mathbf{6,69 \text{ dB}}$$

$$A_{\text{Rain1,0\%}} = 1,186 \text{ dB}$$

$$C/N_{\text{Uplink1,0\%}} = \mathbf{11,08 \text{ dB}}$$

$$A_{\text{Rain2,0\%}} = 0,11 \text{ dB}$$

$$C/N_{\text{Uplink}2,0\%} = \mathbf{12,19 \text{ dB}}$$

Oulu

$$\text{Vaimennuskerroin } \gamma_R = 3,66 \text{ dB/km}$$

$$\text{Efektiivinen etenemistien pituus } L_E = 4,74 \text{ km}$$

$$A_{\text{Rain}0,01\%} = 3,66 \text{ dB/km} \times 4,74 \text{ km} = 13,96 \text{ dB}$$

$$\text{Siirtotien vaimennus } L_A = 215,8 \text{ dB} + 13,96 \text{ dB} = 229,76 \text{ dB}$$

$$C/N_{\text{Uplink}0,01\%} = 48,36 \text{ dBW} - 229,76 \text{ dB} + 26,5 \text{ dBK}^{-1} + 228,6 \text{ dBW/HzK} - 10\log(50 \times 10^6) = \mathbf{-3,3 \text{ dB}}$$

$$A_{\text{Rain}0,1\%} = 6,54 \text{ dB}$$

$$C/N_{\text{Uplink}0,1\%} = \mathbf{4,1 \text{ dB}}$$

$$A_{\text{Rain}1,0\%} = 1,18 \text{ dB}$$

$$C/N_{\text{Uplink}1,0\%} = \mathbf{9,46 \text{ dB}}$$

$$A_{\text{Rain}2,0\%} = 0,175 \text{ dB}$$

$$C/N_{\text{Uplink}2,0\%} = \mathbf{10,53 \text{ dB}}$$

Utsjoki

$$\text{Vaimennuskerroin } \gamma_R = 3,66 \text{ dB/km}$$

$$\text{Efektiivinen etenemistien pituus } L_E = 6,0 \text{ km}$$

$$A_{\text{Rain}} = 3,66 \text{ dB/km} \times 6,0 \text{ km} = 18,0 \text{ dB}$$

$$\text{Siirtotien vaimennus } L_A = 216,85 \text{ dB} + 18,0 \text{ dB} = 234,85 \text{ dB}$$

$$C/N_{\text{Uplink}} = 53,1 \text{ dBW} - 234,85 \text{ dB} + 21,6 \text{ dBK}^{-1} + 228,6 \text{ dBW/HzK} - 10\log(50 \times 10^6) = \mathbf{-8,53 \text{ dB}}$$

$$A_{\text{Rain}0,1\%} = 9,0 \text{ dB}$$

$$C/N_{\text{Uplink}0,1\%} = \mathbf{0,46 \text{ dB}}$$

$$A_{\text{Rain}1,0\%} = 1,6 \text{ dB}$$

$$C/N_{\text{Uplink}1,0\%} = \mathbf{7,86 \text{ dB}}$$

$$A_{\text{Rain}2,0\%} = 0,38 \text{ dB}$$

$$C/N_{\text{Uplink}2,0\%} = \mathbf{9,1 \text{ dB}}$$

7.3 Vaikutukset linkkibudjettiin

Taulukosta 5 sivulla 15 nähdään, miten C/N_D vaikuttaa C/N_{Totaliin} . Taulukosta valitaan keskimäinen rivi linkkibudjetin laskuja varten, koska se vastaa parhaiten mitattuja arvoja. Kuviossa 2 sivulla 34 nähdään C/N :n ja SNR:n mitattu vastaavuus. Kuvion perusteella on arvioita SNR-arvo taulukkoon 11, josta nähdään linkkibudjetti eri sijainneille kirkkaalla kelillä

Taulukko 11. Kirkkaankelin C/N - ja SNR-arvot.

	Kirkas keli		
	Turku	Oulu	Utsjoki
C/N_U	32,5 dB	32,5 dB	32,5 dB
C/N_D	18,7 dB	13,8 dB	14,1 dB
C/U	40 dB	40 dB	40 dB
C/I_D	40 dB	40 dB	40 dB
C/I_{XPD}	30 dB	30 dB	30 dB
C/I_{IMD}	25 dB	25 dB	25 dB
C/N_{Total}	17,3 dB	13,3 dB	13,6 dB
SNR	14,2 dB	11,7 dB	12 dB

Taulukosta 12 nähdään sadevaimennuksen vaikutus linkkibudjettiin eri aikapro-senteilla.

Taulukko 12. Sadekelin C/N- ja SNR-arvot eri aikaprosenteilla.

Sijainti	0,01 %		0,10 %		1 %		2 %	
	C/N _{Total} (dB)	SNR _{Total} (dB)	C/N _{Total} (dB)	SNR _{Total} (dB)	C/N _{Total} (dB)	SNR _{Total} (dB)	C/N _{Total} (dB)	SNR _{Total} (dB)
Turku	6,0	6,0	12,8	12,3	16,2	13,5	17,1	14
Oulu	2,2	2,2	7,4	7,2	12,2	11,4	12,6	12
Utsjoki	0,3	0,3	6,5	6,2	12,2	11,5	12,8	12,2

Asiakasterminaalin ja satelliitin välisen Uplink-osuuden kirkkaankelin C/N- ja SNR-arvot nähdään taulukosta 13. Taulukossa 14 on esitetty Uplinkin sadekelin C/N- ja SNR-arvot eri aikaprosenteilla. SNR-arvot on arvioitu kuviosta 2 sivulla 34.

Taulukko 13. Asiakasterminaalin ja satelliitin väliset kirkkaankelin C/N- ja SNR-arvot.

	Kirkas keli		
	Turku	Oulu	Utsjoki
C/N _{Uplink}	12,3 dB	10,7 dB	9,5 dB
SNR _{Uplink}	11,5 dB	10,0 dB	9,0 dB

Taulukko 14. Asiakasterminaalin ja satelliitin väliset sadekelin C/N- ja SNR-arvot eri aikaprosenteilla.

Sijainti	0,01 %		0,10 %		1 %		2 %	
	C/N _{Uplink} (dB)	SNR _{Uplink} (dB)	C/N _{Uplink} (dB)	SNR _{Uplink} (dB)	C/N _{Uplink} (dB)	SNR _{Uplink} (dB)	C/N _{Uplink} (dB)	SNR _{Uplink} (dB)
Turku	-1,7	-1,7	6,7	6,5	11,1	10,3	12,2	11,3
Oulu	-3,3	-3,3	4,1	4	9,5	9	10,5	9,6
Utsjoki	-8,5	-8,5	0,5	0,5	7,9	7,5	9,1	8,3

8 TUKIJÄRJESTELMÄ

Tukijärjestelmä vianhallintaan tulisi suunnitella siten, että syöttämällä liittymätiedot saataisiin näkyville kyseessä olevan terminaalin ilmoittamat signaalivoimakkuudet, teoreettiset arvot sekä muiden alueella toimivien liittymien signaalivoimakkuudet. Tällöin voidaan nopeasti todeta, liittyykö vika yleiseen ongelmaan alueella vai asiakkaan omiin laitteisiin. Yleiset ongelmat voivat olla vaikeat sääolosuhteet tai Gatewayssä ilmeneviä ongelmia. Asiakkaasta johtuvat ongelmat voivat olla esimerkiksi antennin huono suuntaus, liian suuri kaapelivaimennus tai näköeste antennin ja satelliitin välillä.

Vianselvityksen työkaluihin kuuluisi myös luotettavat reaaliaikaiset säätiedot vikaantuneen liittymän alueelta. Teoreettisten arvojen laskemiseen tarvitaan lämpötila, sadeintensiteetti, suhteellinen ilmankosteus ja ilmanpaine. Muiden alueella toimivien satelliittilaajakaistojen signaalivahvuutta voidaan myös verrata vikaantuneeseen liittymään. Näistä SNR-arvoista voitaisiin laskea keskiarvo, ja verrata sitä tutkittavan liittymän SNR-arvoon.

9 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön aiheena oli selvittää, mitkä tekijät vaikuttavat satelliittilaajakaistan toimivuuteen ja miten niitä voidaan käyttää hyödyksi tukijärjestelmää suunniteltaessa. Opinnäytetyössä tutkittiin aluksi teoriasolla linkkibudjetin parametreja ja siihen vaikuttavia interferenssejä. Nämä tiedot ovat tärkeitä, koska niiden avulla pystytään ennustamaan satelliittilaajakaistan käyttäytymistä myös tulevaisuudessa. Linkkibudjettilaskuilla on määritetty marginaalit, joiden sisällä järjestelmän on toimittava.

Työssä tehtiin myös käytännön mittauksia, joiden avulla saatiin tietoa modeemin ilmoittamien arvojen tarkkuudesta. Vertaamalla spektrianalysointorin ja modeemin signaalitasoja on todettu, että modeemin ilmoittama SNR-arvo käyttäytyy lineaarisesti spektrianalysointorin C/N-arvon kanssa. Tukijärjestelmän toteutukseen voidaan siis luotettavasti käyttää modeemin omaa SNR-arvoa.

Tulosten perusteella linkkibudjetissa rajoittavana tekijänä on downlink-osuus. Tämä on myönteistä, sillä käyttämällä isompaa antennia saadaan sen suuremmasta vahvistuksesta maksimaalinen hyöty irti.

Nykyisin kantoaallolla on paljon aikavälejä vapaana, joten huonontunut C/N-arvo ei vaikuta käytettävyyteen juurikaan. Asiakasmäärien kasvaessa vapaat aikavälit vähenevät ja asiakasterminaalien on käytettävä tehokkaammin aikavälit hyödyksi. Huono suuntaus, ilmakehän vaimennukset, näköesteet yms. alkavat silloin näkyä entistä enemmän käytettävyydessä, vaikka olosuhteet eivät muuten muuttuisi.

Tulevaisuudessa saattaa myös tulla interferenssiä viereisiltä satelliiteilta, jotka alkavat käyttää samaa taajuutta ja polarisaatiota. Silloin asiakkaan on oltava entistä tarkempi siitä, että antenni on suunnattu oikein.

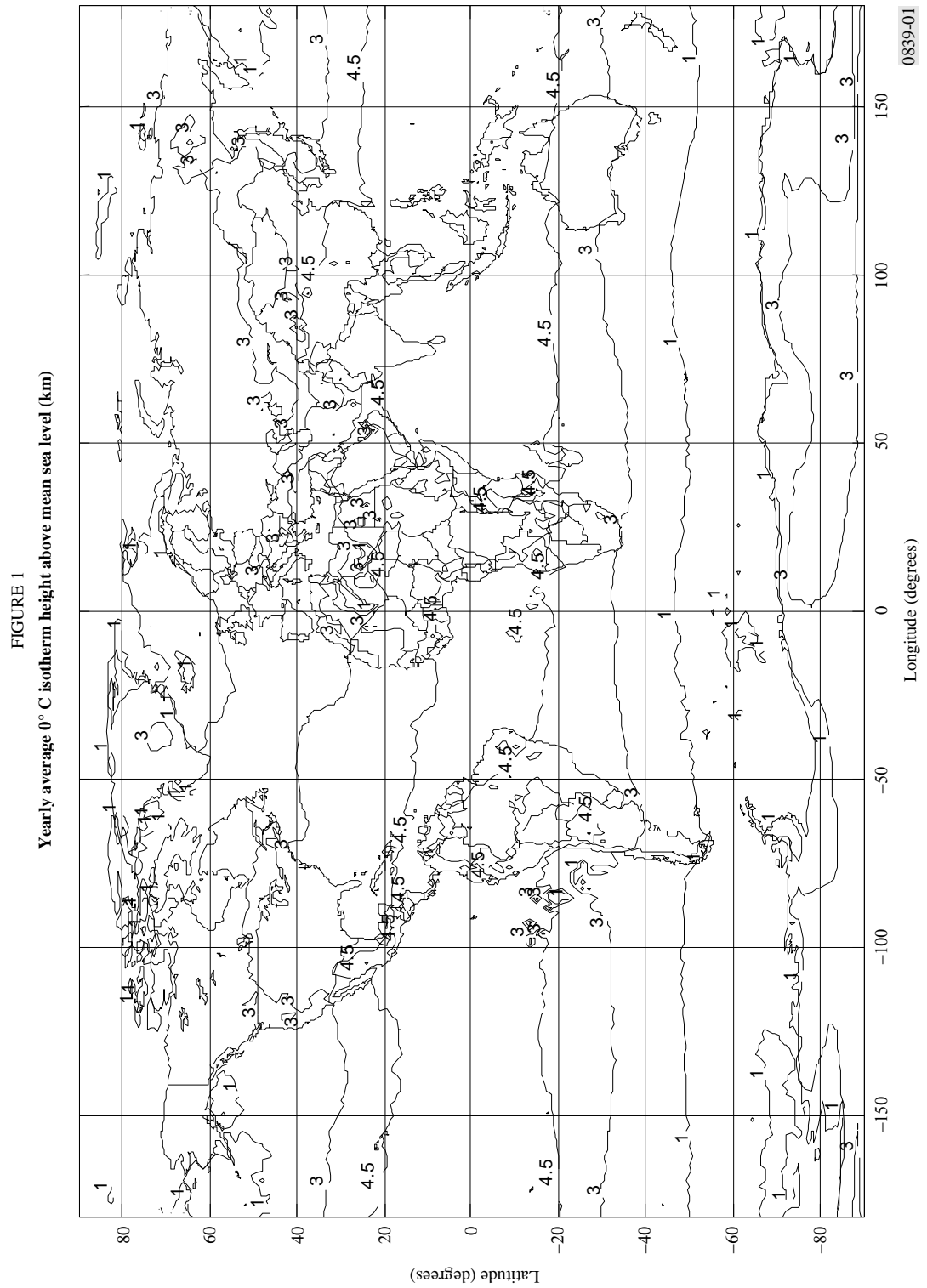
LÄHTEET

- [1] Rytír, M. 2009. Radiowave Propagation at Ka-band (20/30 GHz) for Satellite Communication in High-Latitude Regions. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:no:ntnu:diva-9953>
- [2] Tooway frequently asked questions. Viitattu 25.03.2012. <http://www.tooway.com/FAQ>
- [3] Sonera confidential. Tooway Ka-band Satellite Broadband Transmission system 1/2 PDF
- [4] KA-SAT Finder. Viitattu 10.01.2012. <http://finder.tooway.com>
- [5] Sähköpostikeskustelut ja puhelinneuvottelut Pentti Salosen ja Antti Vihavaisen kanssa. Kevät 2012.
- [6] Elbert, Bruce B. 2008. Introduction to satellite communication. 3rd ed. Artech House: Norwood.
- [7] Viasat Earth Station Antenna Specifications. Viitattu 30.03.2012. http://www.viasat.com/files/assets/9.1m_ka-band_earth_station_011_web.pdf
- [8] Maral, G. 2002. Satellite communication systems: systems, techniques and technology. 4th ed. Englanti: Wiltshire
- [9] Skylogic pdf. Viitattu 30.03.2012. http://www.ratel.rs/upload/documents/javne_rasprave/Javne_konsultacije_o_predlogu_Plana_namene_r-f_opsega/Prilog%20kompanije%20SKYLOGIC.pdf
- [10] Tooway VSAT RF Performance. Viitattu 20.02.2012. http://www.eutelsat.com/satellites/pdf/RF_Characterisation_Tooway.pdf
- [11] Mcgraw-Hill. 1990. Digital satellite communications. 2nd edition. MacMillian: Singapore.
- [12] Maximum Allowed EIRP Density for Ku-Band Transmissions. Viitattu 10.04.2012. <http://www.eutelsat.com/satellites/pdf/off-axis-eirp-density.pdf>
- [13] ITU-R suosituksset. Viitattu 30.01.2012 <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.676-8-200910-l/en>
- [14] ITU-R suosituksset. Viitattu 30.01.2012 <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.840/en>
- [15] ITU-R suosituksset. Viitattu 30.01.2012 <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.453-10-201202-l/en>
- [16] ITU-R suosituksset. Viitattu 30.01.2012 <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.618-10-200910-l/en>
- [17] ITU-R suosituksset. Viitattu 30.01.2012 <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.839/en>

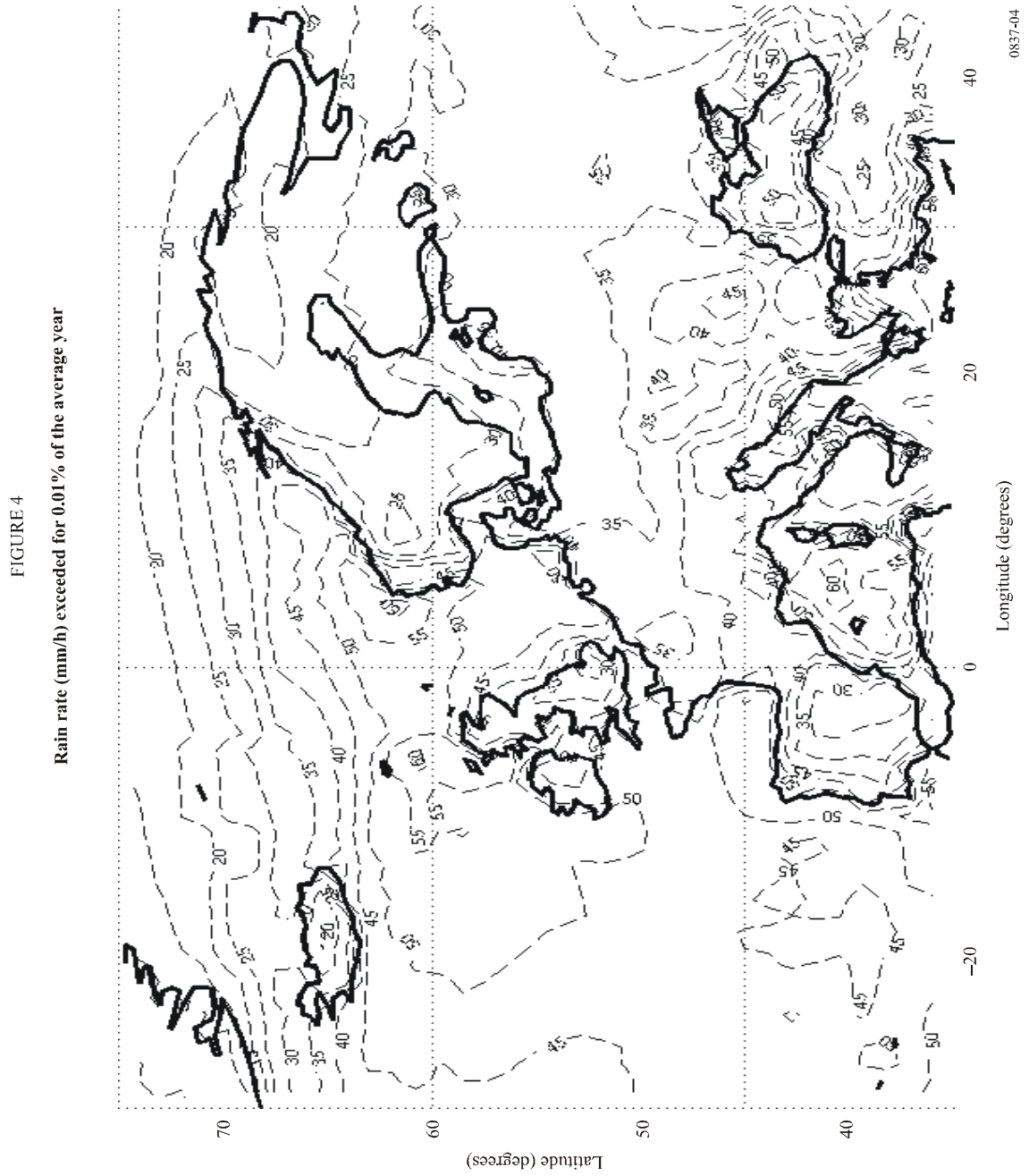
[18] Modeemin ilmoittama SNR-arvo. Viitattu 10.03.2012.
<http://192.168.100.1/index.cgi/?page=modemStatusData>

[19] Sonera confidential. Tooway Ka-band Satellite Broadband Transmission system 2/2 PDF.

Sadevaimennuksen vakiot



Kuva 17. Keskimääräinen vuosittainen sadekorkeus 0°C [17].



Kuva 18. Keskimääräinen vuosittainen sadeintensiteetti 0,01 % ajasta [17].

Taulukko 15. Vakiot sadevaimennukset laskemiseksi [17].

Frequency (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
11	0.01772	1.2140	0.01731	1.1617
12	0.02386	1.1825	0.02455	1.1216
13	0.03041	1.1586	0.03266	1.0901
14	0.03738	1.1396	0.04126	1.0646
15	0.04481	1.1233	0.05008	1.0440
16	0.05282	1.1086	0.05899	1.0273
17	0.06146	1.0949	0.06797	1.0137
18	0.07078	1.0818	0.07708	1.0025
19	0.08084	1.0691	0.08642	0.9930
20	0.09164	1.0568	0.09611	0.9847
21	0.1032	1.0447	0.1063	0.9771
22	0.1155	1.0329	0.1170	0.9700
23	0.1286	1.0214	0.1284	0.9630
24	0.1425	1.0101	0.1404	0.9561
25	0.1571	0.9991	0.1533	0.9491
26	0.1724	0.9884	0.1669	0.9421
27	0.1884	0.9780	0.1813	0.9349
28	0.2051	0.9679	0.1964	0.9277
29	0.2224	0.9580	0.2124	0.9203
30	0.2403	0.9485	0.2291	0.9129