

**Sami Rantanen**

# **Satelliittijärjestelmän linkkibudjettianalyysi**

Tietotekniikan kandidaatintutkielma

20. joulukuuta 2013

Jyväskylän yliopisto

Tietotekniikan laitos

**Tekijä:** Sami Rantanen

**Yhteystiedot:** sami.j.rantanen@jyu.fi

**Ohjaaja:** Anneli Heimbürger

**Työn nimi:** Satelliittijärjestelmän linkkibudjettianalyysi

**Title in English:** The Link Budget Analysis of The Satellite System

**Työ:** Kandidaatintutkielma

**Suuntautumisvaihtoehto:** Ohjelmistotekniikka

**Sivumäärä:** 32+0

**Tiivistelmä:** Tutkielmassa selvitetään kirjallisuuskatsauksen avulla DVB-S ja DVB-RCS standardien mukaisten interaktiivisten satelliittijärjestelmien linkkibudjettia. Toisen sukupolven standardien eli DVB-S2 ja DVB-RCS2 mukaisten järjestelmien erityispiirteiden huomioiminen linkkibudjetin kannalta on tutkielman keskeinen teema. Tutkielma pyrkii antamaan selkeän kuvan satelliittijärjestelmän linkkibudjetista sekä tuomaan näkökulmia satelliittijärjestelmien jatkotutkimukseen ja suunnittelutyöhön.

**Avainsanat:** DVB, DVB-S, DVB-RCS, DVB-S2, DVB-RCS2, satelliitti kommunikatio, linkkibudjetti

**Abstract:** This paper discusses the link budget of the satellite systems based on DVB-S and DVB-RCS standards. Used method is literature review. The key theme is to study specialties of the systems based on the second generation of DVB specifications, DVB-S2 and DVB-RCS2, from the link budget point of view. The paper aims to clearly describe the link budget of the satellite system and to give view points for future studies and research work.

**Keywords:** DVB, DVB-S, DVB-RCS, DVB-S2, DVB-RCS2, satellite communications, link budget

## Kuviot

Kuvio 1. Viitemalli interaktiiviselle DVB -systemille (ETSI 2009a). .....	6
Kuvio 2. Satelliitti linkki, downlink ja uplink (Hausman 2008).....	8
Kuvio 3. Satelliittilinkin konfiguraatio (Maral ja Bousquest 2009). .....	9
Kuvio 4. Esimerkki uplink:n linkkibudjetin laskennasta ilman häiriötä, kir- kaalla säällä (Maral ja Bousquest 2009). .....	21

# Sisältö

LYHENTEET .....	1
1 JOHDANTO .....	3
2 SATELLIITTIJÄRJESTELMÄ.....	5
3 LINKKIBUDJETIN MUODOSTAVAT SEIKAT .....	9
3.1 Lähetin ja vastaanotin .....	9
3.2 Ilmakehän vaikutukset .....	13
3.3 Häiriöt.....	14
4 LINKKIBUDJETIN LASKEMINEN .....	15
5 DVB-S2 JA DVB-RCS2 VAIKUTUS LINKKIBUDJETTIIN .....	22
6 YHTEENVETO .....	24
LÄHTEET.....	26

# Lyhenteet

**16APSK** 16-ary Amplitude and Phase Shift Keying

**16QAM** 16-ary Quadrature Amplitude Modulation

**32APSK** 32-ary Amplitude and Phase Shift Keying

**8PSK** 8-ary Phase Shift Keying

**ACM** Adaptive Coding and Modulation

**BPSK** Binary Phase Shift Keying

**CENELEC** The European Committee for Electrotechnical Standardization

**CINR** Carrier to Interference+Noise Ratio

**DL** downlink

**DVB** Digital Video Broadcasting

**DVB-RCS** Digital Video Broadcasting Return Channel by Satellite

**DVB-RCS2** Digital Video Broadcasting - Interactive Satellite System, Return Channel by Satellite second generation

**DVB-S** DVB System for satellite broadcasting

**DVB-S2** second generation DVB System for satellite broadcasting and unicasting

**EIRP** Effective Isotropic Radiated Power

**ES** Earth Station

**ETSI** The European Telecommunications Standards Institute

**FEC** Forward Error Correction

**FSL** Free Space Loss

**GW** gateway

**MODCOD** MODulation-CODing combination

**QPSK** Quaternary Phase Shift Keying

**RCST** Return Channel Satellite Terminal

**SINR** Signal-to-Interference+Noise Ratio

**UL** uplink

# 1 Johdanto

Linkkibudjetti on satelliittijärjestelmän olennainen elementti. Se ei ole varsinainen osa järjestelmää vaan käsite, joka muodostuu järjestelmän komponenttien ominaisuuksien sekä siirtotien eri olosuhteiden tuloksena. Sen avulla mitataan järjestelmän suorituskykyä siirtää lähettäjän signaali vastaanottajalle. Linkkibudjetin ymmärtäminen luo oleellisen pohjan muiden järjestelmän osien ymmärtämiselle niiden suunnittelemiseksi, säätämiseksi sekä optimoimiseksi. (Maral ja Bousquest 2009)

Tutkielmassa analysoidaan kirjallisuuskatsaukseen pohjautuen DVB-S (DVB System for satellite broadcasting) ja DVB-RCS (Digital Video Broadcasting Return Channel by Satellite) standardien mukaisten interaktiivisten satelliittijärjestelmien linkkibudjettiin vaikuttavia tekijöitä. Kyseiset satelliittijärjestelmät ovat tiedonsiirtoon tarkoitettuja järjestelmiä, joissa välitetään yleislähetyksiä, mm. TV lähetykset ja uutispalvelut, sekä käyttäjien välistä liikennettä kuten Internet-liikenne (ETSI 2009a). Erityisesti pohditaan linkkibudjettia standardien uusimpien versioiden DVB-S2 - (second generation DVB System for satellite broadcasting and unicasting) ja DVB-RCS2 (Digital Video Broadcasting - Interactive Satellite System, Return Channel by Satellite second generation) näkökulmasta. Tutkielmassa rajoitutaan siis tutkimaan satelliittijärjestelmiä, jotka perustuvat geostationaaristen satelliittien käyttöön. Geostationaariset satelliitit ovat maasta katsottuna paikallaan pysyviä. (Maral ja Bousquest 2009, luku 2.2.5).

Tutkielma ei kaiken kattavasti analysoi satelliittijärjestelmän linkkibudjettia, vaan pyrkii kuvaamaan olennaisimmat siihen vaikuttavat komponentit ja parametrit. Se pyrkii vastaamaan esimerkiksi siihen millainen lähetysteho tarvitaan, jotta päästään tietyin oletuksin ja reunaehdoin (mm. vapaan tilan vaimennus, antennivahvistukset) tavoiteltuun vastaanotettuun tehoon. Lisäksi pohditaan linkkibudjetin merkitystä, seikkoja sekä tapoja sen todentamiseksi. Tutkielma tuo konkreettista käytännön hyötyä sekä tulokset antavat oman panoksensa aihealueen kehitykselle ja tutkimukselle.

Tutkielmassa esitellään lyhyesti DVB -satelliittijärjestelmää sekä DVB -standardeja-kappaleessa 2. Linkkibudjettiin vaikuttavia tekijöitä tarkastellaan kappaleessa 3 ja linkkibudjetin laskentaa kappaleessa 4. DVB -standardien toisen sukupolven vaikutuksia linkkibudjettiin pohditaan kappaleessa 5.

Kappaleessa 6 linkkibudjetin vaikutusta satelliittijärjestelmän toimintaan pohditaan lähinnä siitä näkökulmasta, että voidaanko uusilla tekniikoilla tai standardin parannuksilla sen merkitystä vähentää. Toisin sanoen löytää keinoja parantaa viestitystä huonon linkkibudjetin tapauksissa. Linkkibudjetin rooli satelliittijärjestelmän osana ja sen vaikutuksen huomioon ottaminen järjestelmien suunnittelussa sekä standardointityössä tuodaan myös esille.

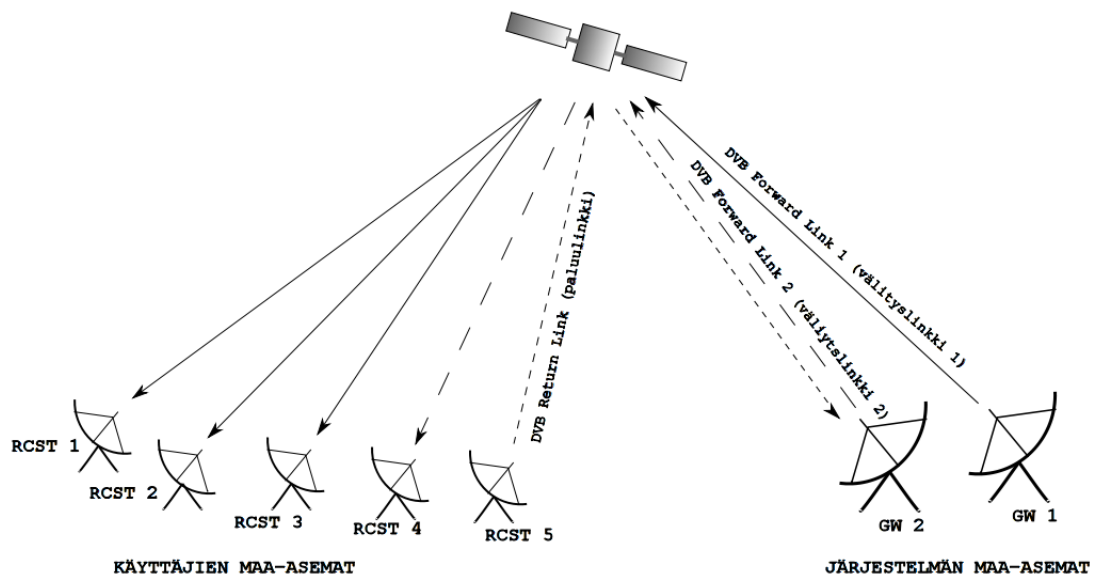


## 2 Satelliittijärjestelmä

Tutkielmassa rajoitutaan tutkimaan Digital Video Broadcasting (DVB) project -organisaation kehittämiin standardeihin, DVB-S/DVB-RCS sekä DVB-S2/DVB-RCS2, perustuvien satelliittijärjestelmien linkkibudjettia. Vuonna 1993 perustettu, alunperin eurooppalainen, DVB project on maailmanlaajuinen mm. satelliittioperaattoreista, laitevalmistajista, verkko-operaattoreista ja ohjelmistokehittäjistä koostuva globaalien digitaalisen median ja lähetyspalveluiden välitykseen avoimia standardeja kehittävä teollisuusvetoinen organisaatio (DVB Org 2013b). DVB project kehittää standardeja käytännön tarpeiden pohjalta kansainvälisten standardointielinten kautta, kuten The European Telecommunications Standards Institute (ETSI) tai The European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC) (DVB Org 2013b).

DVB-S (ETSI 1997) ja DVB-S2 (ETSI 2013) tekniset ETSI:n standardit määrittelevät välityskanavan (välityslinkin) järjestelmän maa-asemalta, gateway (GW), satelliitin kautta käyttäjän asemille, Return Channel Satellite Terminal (RCST). DVB-S on standardiperheen ensimmäinen versio ja toimii perustana monille digitaalisille TV-palveluille ympäri maailman. Toisen sukupolven standardi DVB-S2 parantaa järjestelmän suorituskykyä uusien kanavakoodausten, joustavan koodauksen ja moduuloinnin sekä tehokkaamman virheenkorjauksen keinoin. DVB-S ensimmäinen versio julkaistiin vuonna 1994 ja sen seuraajan, DVB-S2, ensimmäinen virallinen versio vuonna 2005 sekä viimeisin päivitysversio vuonna 2013. (DVB Org 2012b; Morello ja Mignone 2006, luku Introduction)

DVB-RCS (ETSI 2009a) ja DVB-RCS2 (ETSI 2012b, 2012a, 2012c) tekniset ETSI:n standardit määrittelevät paluukanavan (paluulinkin) käyttäjän maa-asemalta satelliitin kautta järjestelmän (palveluntarjoajan) maa-asemalle. DVB-RCS2 on toisen sukupolven standardi, joka määrittelee edeltäjänsä (DVB-RCS) tehokkaamman järjestelmän tuoden mukanaan mm. Internetin käyttäjän ulottuville ilman paikallista maanläheistä verkkoa. Standardit määrittelevät myös tarvittavan viestirakenteen interaktiiviselle liikenteelle, joka on integroitu välityskanavaan



Kuvio 1. Viitemalli interaktiiviselle DVB -systemille (ETSI 2009a).

DVB-S/DVB-S2 viestimääritykehyksen mukaan. DVB-RCS ensimmäinen versio julkaistiin vuonna 2000 ja sen seuraajan, DVB-RCS2, ensimmäinen virallinen versio vuonna 2011 sekä viimeisin versio vuonna 2012. (DVB Org 2012a)

Toisen sukupolven standardien kehitys jatkuu edelleen (DVB Org 2012b, 2012a). Niiden mukanaan tuomia uusia ominaisuuksia tarkastellaan tarkemmin ominaisuuksien hyötyjä linkkibudjetin kannalta pohdittaessa kappaleessa 5.

DVB:n standardien mukainen interaktiivinen satelliittijärjestelmä perustuu geostationaaristen välitinsatelliittien käyttöön. Satelliitteja on yksi tai useampi järjestelmän laajuudesta riippuen. Satelliitit välittävät signaalin maa-asemalta toiselle. (ETSI 2009a)

Geostationaariset satelliitit ovat 35781.1 kilometrin korkeudessa päiväntasaajan yläpuolella maata kiertäviä satelliitteja. Ne kiertävät maata samalla kulmanopeudella kuin maa pyörii akselinsa ympäri sekä samaan suuntaan kuin maa. Siten ne näyttävät maasta katsoen pysyvän koko ajan samalla paikalla. (Maral ja Bousquest 2009)

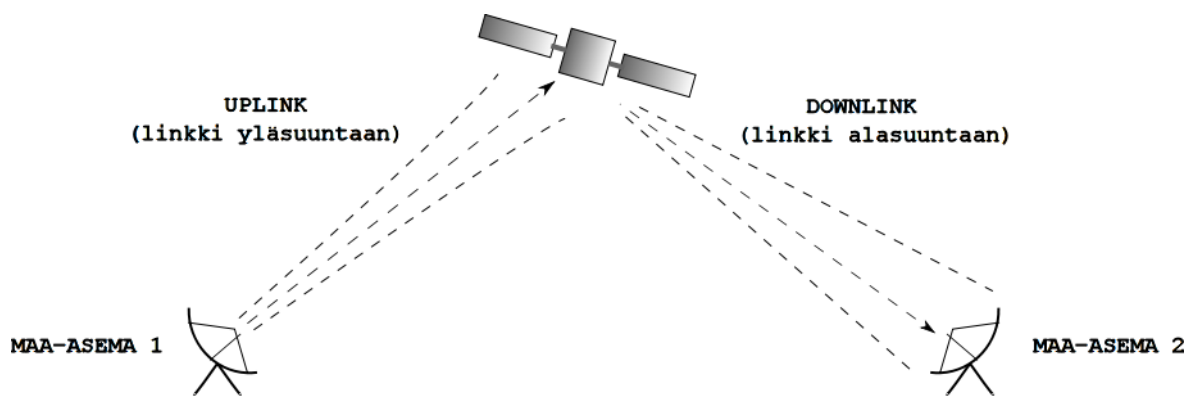
Interaktiivinen DVB -satelliittijärjestelmä jakaantuu loogisesti kahteen verkkoon, y-

leislähetys- (broadcast) ja vuorovaikutteiseen (interaction) verkkoon. Yleislähetysverkossa liikenne, kuten TV-lähetykset, tapahtuu yksisuuntaista yleislähetyskanavaa (broadcast channel) pitkin palveluntarjoalta käyttäjille. Vuorovaikutteisessa verkossa liikenne tapahtuu kaksisuuntaisesti vuorovaikutuskanavassa (interaction channel) palveluntarjoajan ja käyttäjän tai kahden käyttäjän välillä. (ETSI 2012b, 2009a, 1997, 2009b)

Liikenne järjestelmästä käyttäjien suuntaan tapahtuu forward link:n (lähetylinkki) kautta. Forward link kuljettaa sekä yleisliikennettä että käyttäjäkohtaista eli yksilöllistä liikennettä (broadcast ja unicast). Forward link:n muodostavien kanavien määrä riippuu järjestelmän konfiguraatiosta ja yksi kanava voi kuljettaa sekä yleisliikennettä että käyttäjäkohtaista liikennettä. Kuviossa 1 *forward link 1* kuvaa yleisliikennettä järjestelmän maa-asemalta (GW 1) käyttäjäterminaali maa-asemille (RCST 1, RCST 2 ja RCST 3) ja *forward link 2* kuvaa yksilöllistä liikennettä järjestelmän maa-asemalta (GW 2) käyttäjän maa-asemalle (RCST 4). Käyttäjien suunnasta järjestelmään liikenne tapahtuu return link:n (paluulinkki) kautta. Return link sisältää yksilöllistä (unicast) liikennettä toiselle käyttäjälle tai palvelupyynnöjä järjestelmään. Kuviossa 1 *return link* kuvaa yksilöllistä liikennettä käyttäjän maa-asemalta (RCST 5) järjestelmän maa-asemalle (GW 2). (ETSI 2012b, 2009a, 1997, 2009b)

Linkkiä lähettävästä maa-asemasta satelliittiin kutsutaan *uplink (UL)* (yläsuunnan linkki) ja vastaavasti linkkiä satelliitista vastaanottavaan maa-asemaan *downlink (DL)* (alasuunnan linkki) kuten esimerkiksi Hausman (2008) kurssimateriaalissaan kuvaa. Tässä tutkielmassa tutkitaan linkkibudjettia näiden kuvion 2 mukaisen uplink- ja downlink -linkkien muodostaman kahden maa-aseman välisen linkin kannalta. Sillä onko kyseessä forward link tai return link ei ole oleellista merkitystä tutkielman linkkibudjettianalyysiin ellei erikseen ole mainittu.

Vaikka linkkibudjettianalyysi perustuu DVB:n standardien mukaisiin satelliittijärjestelmiin, voidaan analyysin oppeja soveltaa myös muiden satelliittijärjestelmien linkkibudjetin analysoimiseksi. Itse linkkibudjetti on laskettavissa samalla periaatteella myös muiden kuin geostationaaristen satelliittien käyttöön perustuvissa järjestelmissä. Esimerkiksi liikkuvan satelliitin tapauksessa budjetti voidaan laskea sa-

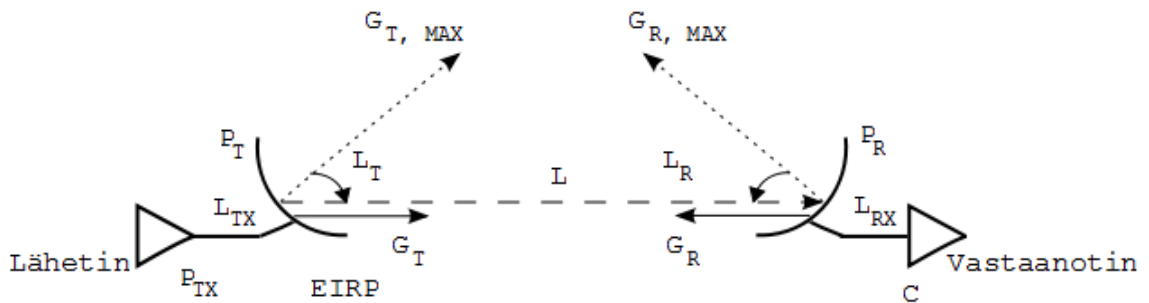


Kuvio 2. Satelliitti linkki, downlink ja uplink (Hausman 2008).

malla periaatteella aina tietyllä ajan hetkellä.

### 3 Linkkibudjetin muodostavat seikat

Linkkibudjettiin vaikuttavat satelliittijärjestelmän lähetin- ja vastaanotinkomponenttien ominaisuudet, siirtotien ominaisuudet ja olosuhteet sekä järjestelmän sisäiset ja ulkoiset häiriöt (Maral ja Bousquest 2009). Tutkielmassa rajoitutaan tutkimaan tärkeimpiä budjettiin vaikuttavia seikkoja ja tekijöitä. Analysoitava satelliittilinkki joko maa-asemalta satelliittiin tai satelliitista maa-asemaan käsittää polun lähettimestä vastaanottimeen kuvion 3 mukaisesti.



Kuvio 3. Satelliittilinkin konfiguraatio (Maral ja Bousquest 2009).

Kuviossa 3  $P_{TX}$  on lähettimen lähetysteho,  $L_{TX}$  on lähettimen ja antennin syötön välinen vaimennus,  $G_{T, MAX}$  lähettimen antennin maksimivahvistus,  $L_T$  lähettimen antennin vaimennus,  $G_T$  lähettimen antennin vahvistus,  $EIRP$  (*Effective Isotropic Radiated Power*) on lähettimen antennilta lähtevä signaalin teho,  $G_{R, MAX}$  vastaanottimen antennin maksimivahvistus,  $L_R$  vastaanottimen antennin vaimennus,  $G_R$  vastaanottimen antennin vahvistus,  $L_{RX}$  on vastaanottimen ja antennin syötön välinen vaimennus sekä  $C$  on vastaanottimen kokema vastaanotettu teho. Näitä linkkibudjettiin vaikuttavia termejä käsitellään tarkemmin myöhemmin tässä kappaleessa. (Maral ja Bousquest 2009)

#### 3.1 Lähetin ja vastaanotin

Satelliitin ja maa-aseman antennin ominaisuudet ovat merkittävä tekijä lähettimen ja vastaanottimen ominaisuuksista. Antennin ominaisuuksista lähinnä antennin vah-

vistus vaikuttaa eniten sekä lähetettäessä että vastaanottaessa signaalin vahvuuteen. (Maral ja Bousquest 2009)

*Antennin maksimivahvistus* (kuviossa 3  $G_{T, MAX}$  ja  $G_{R, MAX}$ ) voidaan laskea satelliiteissa ja maa-asevilla käytettäville isotrooppisille antenneille (lautasantenneille) kaavoilla (3.1) ja (3.2) seuraavasti

$$G_{MAX} = \eta \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 = \eta \left( \frac{\pi D f}{c} \right)^2 \quad (3.1)$$

$$[G_{MAX}] = 10 \log_{10} \left( \eta \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right) = 10 \log_{10} \left( \eta \left( \frac{\pi D f}{c} \right)^2 \right) \text{ (dBi)} \quad (3.2)$$

jossa  $\eta$  on antennin tehokkuuskerroin,  $D$  antennin (lautasen) halkaisija,  $\lambda$  signaalin käytetty aallonpituus eli  $\lambda = \frac{c}{f}$ ,  $f$  on käytetty keskitaajuus hertzeinä (Hz),  $c$  on valon nopeus (299792458 m/s) ja  $dBi$  isotrooppisten antennien yhteydessä käytetty vahvistuksen desibelimerkintä. (Maral ja Bousquest 2009; DeBoy 2013; Hausman 2007)

Antennin maksimivahvistus saavutetaan, kun antenni on suunnattu optimaalisesti (suoraan kohteeseen). Maksimivahvistus vähenee suhteessa suuntauksen poikkeavuuteen optimaalisesta suuntauksesta (pointing loss). Lisäksi suuntauksen epätarkkuus aiheuttaa vastaanottimen päässä myös polarisoinnin epätäydellisyyttä heikentäen vahvistusta eli aiheuttaa ns. polarisointi vaimennuksen. Kuviossa 3  $L_T$  ja  $L_R$  kuvaavat näitä antenninsuuntauksen epätarkkuudesta aiheutuvia vaimennuksia sekä  $G_T$  ja  $G_R$  lopullisia vahvistuksia lähettimen ja vastaanottimen välillä. (Maral ja Bousquest 2009; DeBoy 2013)

Antennien suuntauksella on merkittävä vaikutus antennien vahvistuksiin sitä kautta signaalin kuuluvuuteen. Vahvistukseen vaikuttavaa antennin kokoa ei voida kasvattaa rajattomasti. Tähän rajoituksia asettaa mm. satelliitin suhteellisen pieni koko ja käyttäjien maa-asevilla mahdollisesti esteettiset syyt sekä sijoituspaikka. Toisaalta antennin koolle asettaa rajoituksensa myös antennin valmistus- ja materiaalikustannukset. Maa-asemaa ei myöskään sijoitu aina satelliitin lähetykskeilan (spot-

beam) keskelle (optimipaikkaan) eli suuntauksen epätarkkuudesta aiheutuvat vaimennukset ovat väistämättömiä. (Maral ja Bousquest 2009)

Lähettimen teho sekä lähettimen antennin vahvistus vaikuttavat suoraan lähetettävään signaaliin. Lähetettävää signaalia heikentää vielä antennin ja lähettimen välinen häviö (kuviossa 3  $L_{TX}$ ). Siirtotiellä signaalia vielä vaimentavat erilaiset häiriöt sekä ilmatien vaimentavat ominaisuudet sekä olosuhteet (kuviossa 3  $L$ ). Vastaavasti vastaanotetun signaalin kuuluvuuteen vaikuttaa vastaanottimen antennin ominaisuudet sekä vaimennus antennin ja vastaanottimen välillä (kuviossa 3  $L_{RX}$ ). (Maral ja Bousquest 2009)

Lähinnä lähettimen teho ja lähettimen antennin vahvistus määrittelevät voimakkuuden, jolla signaali lähtee lähettimestä. Lähettimen tehoa tulee säädellä tarkoituksen mukaiseksi. Esimerkiksi suuri teho luonnollisesti parantaa signaalin perille menoa vastaanottajalle. Tehoa ei kuitenkaan ole tarkoituksen mukaista ja järkevää nostaa mielin määrin. Suurempi teho vaatii enemmän itse lähettimeltä sekä luonnollisesti enemmän energiaa. Toisaalta tehon nosto aiheuttaa enemmän häiriöitä järjestelmän muille osille ja toisille käyttäjille sekä järjestelmille. (Maral ja Bousquest 2009)

*Effective Isotropic Radiated Power (EIRP)* eli lähettimen vastaanottimen suuntaan lähettämä teho. Lähettimen oletetaan lähettävän signaalin ympärisäteilevästi samalla voimakkuudella joka suuntaan. EIRP:n muodostavat lähettimen teho sekä antennin vahvistus seuraavien kaavojen (3.3) ja (3.4) mukaisesti

$$EIRP = P_T G_T \text{ (W)} \quad (3.3)$$

$$[EIRP] = [P_T] + [G_T] \text{ (dBW)} \quad (3.4)$$

joissa  $P_T$  on lähettimen teho,  $G_T$  on antennin vahvistus vastaanottajan suuntaan (Maral ja Bousquest 2009; Atayero, Luka ja Alatishe 2011; DeBoy 2013).

*Vapaan tilan vaimennus* (Free Space Loss) vaimentaa lähettimen antennin ja vastaanottimen antennin välillä. Tämä vaimennus kuvaa lähetetyn ja vastaanotetun tehon suhdetta. Vapaan tilan vaimennus johtuu säteiden hajaantumisesta ja se voidaan laskea seuraavalla kaavoilla (3.5) ja (3.6)

$$L_{FS} = \left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi Rf}{c}\right)^2 \quad (3.5)$$

$$[L_{FS}] = 10\text{Log}_{10}(L_{FS}) \text{ (dB)} \quad (3.6)$$

joissa  $R$  on etäisyys maa-aseman ja satelliitin välillä,  $\lambda$  signaalin aallonpituus eli  $\lambda = \frac{c}{f}$ ,  $f$  on käytetty keskitaajuus hertzeinä ja  $c$  on valon nopeus (299792458 m/s). (Maral ja Bousquest 2009; Atayero, Luka ja Alatishe 2011; DeBoy 2013)

Lähetetty signaali kärsii siis matkalla vapaan tilan vaimennuksesta. Vastaanottimen antenni vahvistaa signaalia sen vastaanottajan suuntaan vaikuttaman vahvistuksen verran eli samaan tapaan kuin lähettimen tapauksessa. Vastaanotettu signaali saadaan kaavoista (3.7) ja (3.8)

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R}{L_{FS}} \text{ (W)} \quad (3.7)$$

$$[P_R] = [P_T] + [G_T] - [L_{FS}] + [G_R] \text{ (dBW)} \quad (3.8)$$

joissa  $P_T G_T$  tai  $[P_T] + [G_T]$  on EIRP,  $G_R$  on vastaanottimen antennin vahvistus lähettäjän suuntaan sekä  $L_{FS}$  vapaan tilan vaimennus (Maral ja Bousquest 2009; Atayero, Luka ja Alatishe 2011; DeBoy 2013).

*Kohina* (terminen) koostuu ei-toivotuista tekijöistä, jotka heikentävät vastaanottimen vastaanottamaa signaalia. Kohina muodostuu luonnollisesta säteilystä antennin vaikutuspiirissä ja vastaanottimen omien komponenttien aiheuttamasta koi-



nasta. Kohina voidaan laskea käytetyllä kantaallaalla kaavoista (3.9) ja (3.10)

$$N = N_0B = kTB \quad (3.9)$$

$$[N] = 10\text{Log}_{10}(N) \quad (3.10)$$

joissa  $k$  on Boltzmannin vakio ( $1.379 * 10^{-23}$  (W/KHz)),  $T$  on vastaanottimen kokonaiskohinalämpötila kelvineinä ja  $B$  on kantaallaallon kaistanleveys hertzeinä.  $N_0 = kT$  on kohinan spektritiheys (spectral noise density). (Maral ja Bousquest 2009; DeBoy 2013)

Myös muiden lähettimien kantaallaallojen signaalit, muut kuin mitä on tarkoitettu vastaanottaa, ovat kohinaa, mutta tätä kohinaa kutsutaan häiriöksi. Häiriötä kuvataan hieman tarkemmin kappaleessa 3.3. Kohinan vaikutus itse linkkibudjettiin esitellään tarkemmin linkkibudjetin laskemisen yhteydessä kappaleessa 4.

## 3.2 Ilmakehän vaikutukset

Lähetettyä signaalia vaimentavat ilmakehän ominaisuudet ja olosuhteet. Esimerkiksi sateet ovat merkittävä signaalia vaimentava tekijä. Sateet vaihtelevat alueellisesti paljon. Sateiden huomioimiseksi linkkibudjetissa turvaudutaan tilastollisiin todennäköisyyksiin kuten Maral ja Bousquest (2009) tuovat esille kirjassaan. Myös ilmakehän muut tekijät kuten kaasut ja pilvet vaikuttavat signaalin kulkuun joko vaimentaen tai vääristäen sitä. (Hausman 2007; Maral ja Bousquest 2009)

Tässä tutkielmassa ilmakehän vaikutuksia ei tarkemmin analysoida, vaan niiden voidaan todeta vaikuttavan samankaltaisesti linkkibudjetin laskennassa kuin muutkin vaimennukset tiedettäessä niiden suuruus erilaisten analyysien ja estimaattien tulosten perusteella.

### 3.3 Häiriöt

Lähetettyyn signaaliin vaikuttaa vaimentavasti järjestelmän muiden osien (käyttäjien), toisten satelliittijärjestelmien ja maanpäällisten järjestelmien aiheuttamat häiriöt. Häiriö on siis lähettimen kantoaallon signaali, jota ei ole tarkoitettu vastaanotettavaksi. Häiriötä on monentyyppisiä ja ne johtuvat eri ilmiöistä. (Hausman 2007; Maral ja Bousquest 2009)

Tyydytään kuvataan näistä lyhyesti kaksi merkittävää häiriötä.

*Viereisten kanavien interferenssi* (adjacent channel interference) aiheutuu uplink:ssä järjestelmän muista maa-asemista. downlink:ssä viereisten kanavien interferenssi aiheutuu ei-vastaanottavalle maa-asemalle, joka on satelliitin lähetyssantennin samassa keilassa (spot beam) kuin varsinainen vastaanottava maa-asema. (Hausman 2007; Maral ja Bousquest 2009)

*Saman kanavan interferenssi* (co-channel interference) aiheutuu downlink:ssä, kun satelliitin lähettämän häiritsevän signaalin kantoaallon taajuus ja polarisaatio ovat samat kuin vastaanotettavan kantoaallon taajuus ja polarisaatio maa-asemalla. uplink:ssä saman kanavan interferenssi syntyy satelliitin vastaanottimelle maa-aseman kantoaallostaa, joka käyttää samaa polarisaatiota ja taajuutta kuin varsinainen vastaanotettava signaali. (Hausman 2007; Maral ja Bousquest 2009)

Muita häiriöitä ei kuvata tarkemmin, mutta ne vaikuttavat periaatteessa samaan tapaan linkkibudjetin laskentaan kuin edellä kuvatut.

## 4 Linkkibudjetin laskeminen

Linkkibudjetin laskeminen on oikeastaan varsin yksinkertainen toimitus, kun oleelliset lähtötiedot eli parametrit ovat tiedossa. Vastaanottotehoa laskettaessa lähetystehoon lisätään lähettimen sekä vastaanottimen antennin vahvistukset ja vähennetään kaikki mahdolliset vaimennukset laskettaessa logaritmisesti (desibeleinä). Vastaavasti lineaarisesti (watteina) laskettaessa lähetysteho kerrotaan vahvistuksilla sekä jaetaan vaimennuksilla. Vastaanottotehosta vähennetään vielä kohina- sekä häiriötehot logaritmisessa tapauksessa tai jaetaan kohina- ja häiriötehojen summalla. Näin on saatu laskettua *Signal-to-Interference+Noise Ratio (SINR)*, joka kertoo kanavan signaalin suhteen kohinaan ja häiriöön. Kantoaallon tapauksessa puhutaan suhdeluvusta *Carrier to Interference+Noise Ratio (CINR)*. (Hausman 2007; Maral ja Bousquest 2009; DeBoy 2013)

Linkkibudjetti voidaan laskea monella tapaa tai sen lasku voi sisältää erilaisia vaihteita riippuen lähtöarvoista. Esimerkkinä antennin vahvistus voidaan huomioida tai antaa monella tapaa. Jos saatavilla on antennin vahvistus arvot, voidaan niiden avulla laskuja hieman yksinkertaistaa. Ainoastaan antennin arvojen ollessa lähtötietoina, tulee vahvistus ensin laskea niiden pohjalta. Antennin vahvistus vastaanototapauksessa voidaan myös sisällyttää vastaanottimen hyvyyslukuun  $[G/T]$ , joka kertoo vahvistuksen suhteen järjestelmän kokonaiskohinalämpötilaan. (Hausman 2007; Maral ja Bousquest 2009; DeBoy 2013)

Seuraavaksi esitellään esimerkinomaisesti satelliittilinkin linkkibudjetin laskeminen, sisältäen sekä uplink:n että downlink:n. Sekä lineaarinen että logaritminen laskutapa esitellään. Laskuissa huomioidaan oleellisimmat häviöt, vaimennukset ja häiriöt. Laskelmat perustuvat ns. kirkkaan sään mukaiseen tilanteeseen. Sääolosuhteiden huomioiminen on jätetty kaavoista pois yksinkertaistuksen vuoksi. Sinänsä laskennallisesti sääolosuhteet voidaan lisätä esimerkiksi yhtenä tekijänä ilmatilasta aiheuttamaan vaimennukseen ( $L_A$ ).

*Lähetysteho* maa-asemalta, Earth Station (ES), satelliitille lasketaan huomioiden vai-

mennukset ja häviöt. Lasketaan lisäämällä aiemmin esiteltyihin kaavoihin (3.3) ja (3.4) häviöt sekä vaimennukset seuraavasti eli saadaan kaavat (4.1) ja (4.2)

$$EIRP_{ES} = \frac{P_T^{ES} G_{T, MAX}^{ES}}{L_{TX}^{ES} L_T^{ES}} (W) \quad (4.1)$$

$$[EIRP_{ES}] = [P_T^{ES}] + [G_{T, MAX}^{ES}] - [L_{TX}^{ES}] - [L_T^{ES}] (dBW) \quad (4.2)$$

joissa  $[P_T^{ES}]$  on maa-aseman lähetysteho,  $G_{T, MAX}^{ES}$  on maa-aseman antennin maksimi vahvistus,  $L_{TX}^{ES}$  tehohäviö siirrettäessä signaali lähettimeltä antennille ja  $L_T^{ES}$  on antennin vaimennus. Antennin vaimennuksella huomioidaan suuntauksen ero optimaaliseen suuntaukseen. (Hausman 2007; Maral ja Bousquest 2009; DeBoy 2013) Optimaalisessa suuntauksessa antennin vaimennus on 0 [dB].

*Vastaanotettu teho* (C) satelliitissa lasketaan huomioiden kaavoissa (3.7) ja (3.8) vapaan tilan vaimennus (FSL) ja vaimennukset ilmatilassa sekä vastaanottimessa, kaavoilla (4.3) ja (4.4)

$$C_{SAT} = \frac{EIRP_{ES} G_{R, MAX}^{SAT}}{L_{FS} L_A L_R^{SAT} L_{RX}^{SAT}} (W) \quad (4.3)$$

$$[C_{SAT}] = [EIRP_{ES}] - [L_{FS}] - [L_A] + [G_{R, MAX}^{SAT}] - [L_R^{SAT}] - [L_{RX}^{SAT}] (dBW) \quad (4.4)$$

joissa  $EIRP_{ES}$  on maa-aseman lähetysteho vaimennukset huomioituna,  $G_{R, MAX}^{SAT}$  satelliitin antennin maksimivahvistus,  $L_{FS}$  vapaan tilan vaimennus,  $L_A$  ilmatilasta aiheutuvat vaimennukset,  $L_R^{SAT}$  satelliitin antennin vaimennus ja  $L_{RX}^{SAT}$  tehohäviö siirrettäessä signaali antennilta vastaanottimelle. (Hausman 2007; Maral ja Bousquest 2009; DeBoy 2013)

*SINR satelliitissa* (uplink) lasketaan huomioimalla sekä kohina että häiriö kaavalla (4.5)

$$SINR_{SAT} = \left( \left( \frac{C_{SAT}}{N_{SAT}} \right)^{-1} + \left( \frac{C_{SAT}}{I_{SAT}} \right)^{-1} \right)^{-1} \quad (4.5)$$

jossa  $C_{SAT}$  on vastaanotettu teho satelliitissa (vaimennukset ja häviöt huomioituna),  $N_{SAT}$  vastaanottimen kokema kohina satelliitissa ja  $I_{SAT}$  vastaanotettuun signaaliin vaikuttavat häiriöt satelliitissa. (Maral ja Bousquest 2009; DeBoy 2013)

*Lähetysteho* (EIRP) satelliitilta maa-asemalle lasketaan huomioiden vaimennukset ja häviöt. Lasketaan lisäämällä kaavoihin 3.3 ja 3.4 häviöt sekä vaimennukset seuraavasti kaavoilla 4.6 ja 4.7

$$EIRP_{SAT} = \frac{P_T^{SAT} G_{T, MAX}^{SAT}}{L_{TX}^{SAT} L_T^{SAT}} (W) \quad (4.6)$$

$$[EIRP_{sat}] = [P_T^{SAT}] + [G_{T, MAX}^{SAT}] - [L_{TX}^{SAT}] - [L_T^{SAT}] (dBW) \quad (4.7)$$

joissa  $P_T^{SAT}$  on satelliitin lähetysteho,  $G_{T, MAX}^{SAT}$  on satelliitin antennin maksimi vahvistus,  $L_{TX}^{SAT}$  tehohäviö siirrettäessä signaali lähettimeltä antennille ja  $L_T^{SAT}$  on antennin vaimennus. (Hausman 2007; Maral ja Bousquest 2009; DeBoy 2013)

*Vastaanotettu teho* (C) maa-asemalla lasketaan huomioiden kaavoissa (3.7) ja (3.8) vapaan tilan vaimennus ja vaimennukset ilmatilassa sekä vastaanottimessa eli kaavoilla (4.8) ja (4.9)

$$C_{ES} = \frac{EIRP_{SAT} G_{R, MAX}^{SAT}}{L_{FS} L_A L_R^{SAT} L_{RX}^{SAT}} (W) \quad (4.8)$$

$$[C_{ES}] = [EIRP_{SAT}] - [L_{FS}] - [L_A] + [G_{R, MAX}^{SAT}] - [L_R^{SAT}] - [L_{RX}^{SAT}] \quad (4.9)$$

joissa  $EIRP_{SAT}$  on satelliitin lähetysteho vaimennukset huomioituna,  $G_{R, MAX}^{SAT}$  maa-aseman antennin maksimivahvistus,  $L_{FS}$  vapaan tilan vaimennus,  $L_A$  ilmatilasta aiheutuvat vaimennukset,  $L_R^{SAT}$  maa-aseman antennin vaimennus ja  $L_{RX}^{SAT}$  tehohäviö

siirrettäessä signaali antennilta vastaanottimelle. (Hausman 2007; Maral ja Bousquest 2009; DeBoy 2013)

*SINR maa-asemassa* (downlink) lasketaan huomioimalla sekä kohina että häiriö kaavalla (4.10)

$$SINR_{ES} = \left( \left( \frac{C_{ES}}{N_{ES}} \right)^{-1} + \left( \frac{C_{ES}}{I_{ES}} \right)^{-1} \right)^{-1} \quad (4.10)$$

jossa  $C_{ES}$  on vastaanotettu teho maa-asemalla (vaimennukset ja häviöt huomioituna),  $N_{ES}$  vastaanottimen kokema kohina maa-asemalla ja  $I_{ES}$  vastaanotettuun signaaliin vaikuttavat häiriöt maa-asemalla. (Maral ja Bousquest 2009; DeBoy 2013)

*Satelliittilinkin yhdistetty SINR* lasketaan huomiomalla SINR sekä satelliitissa että vastaanottavalla maa-asemalla (UL + DL) kaavalla (4.11)

$$SINR_{comb} = \left( (SINR_{SAT})^{-1} + (SINR_{ES})^{-1} \right)^{-1} \quad (4.11)$$

jossa  $SINR_{SAT}$  on SINR satelliitissa ja  $SINR_{ES}$  SINR vastaanottavalla maa-asemalla. (Maral ja Bousquest 2009; DeBoy 2013)

$C/N_0$  eli signaali-kohina suhteen tiheys (density).  $C/N_0$  kertoo kaistanleveys riippumattomasti kohina-signaalisuhteen ja se voidaan laskea satelliittilinkin SINR:stä kaavalla (4.12)

$$C/N_0 = (SINR)(B) \quad (4.12)$$

jossa  $SINR$  on satelliittilinkin SINR (yhdistetyn tai yhden linkin) ja  $B$  on käytetyn kanavan (kantoaallon) kaistanleveys. (Maral ja Bousquest 2009; DeBoy 2013)

Signaali-kohina suhteen tiheys  $C/N_0$  on arvo, joka kertoo satelliittilinkin suorituskyvyn ja sen perusteella voidaan mitoittaa satelliittiverkon osia sekä säätää verkon toimintaa. (Deplancq ym. 2005; TutorialsWeb 2013; Atayero, Luka ja Alatishe 2011; Hausman 2007; DeBoy 2013; Maral ja Bousquest 2009)

Yleistettynä  $C/N_0$  voidaan laskea yhdelle linkille ilman häiriöitä kirkkaalla säällä kaavoilla (4.13) ja (4.14)

$$C/N_0 = EIRP(G/T)(1/L)(1/k) \quad (4.13)$$

$$[C/N_0] = [EIRP] + [G/T] - [L] - [k] \quad (4.14)$$

joissa EIRP on lähetysteho vastaanottajan suuntaan,  $G/T$  on vastaanottimen hyvyysluku,  $L$  kokonaisvaimennus (ilman sään vaikutusta) ja  $k$  on Boltzmannin vakio ( $1.379 * 10^{-23}$  (W/KHz)). (Maral ja Bousquest 2009)

Kahden linkin (uplink + downlink) yhdistetty SINR eli voidaan merkitä myös  $\frac{C}{N}$  saadaan kaavasta (4.15)

$$\frac{C}{N_{comb}} = \left( \left( \frac{C}{N_{up}} \right)^{-1} + \left( \frac{C}{N_{down}} \right)^{-1} \right)^{-1} \quad (4.15)$$

joissa  $\frac{C}{N_{up}}$  on uplink:n (satelliitin vastaanoton)  $\frac{C}{N}$  ja  $\frac{C}{N_{down}}$  on downlink:n (maa-aseman vastaanoton)  $\frac{C}{N}$ . (DeBoy 2013)

Kun  $\frac{C}{N}$ :ssa halutaan huomioida häiriö, saadaan se laskettua seuraavasti kaavalla (4.16)

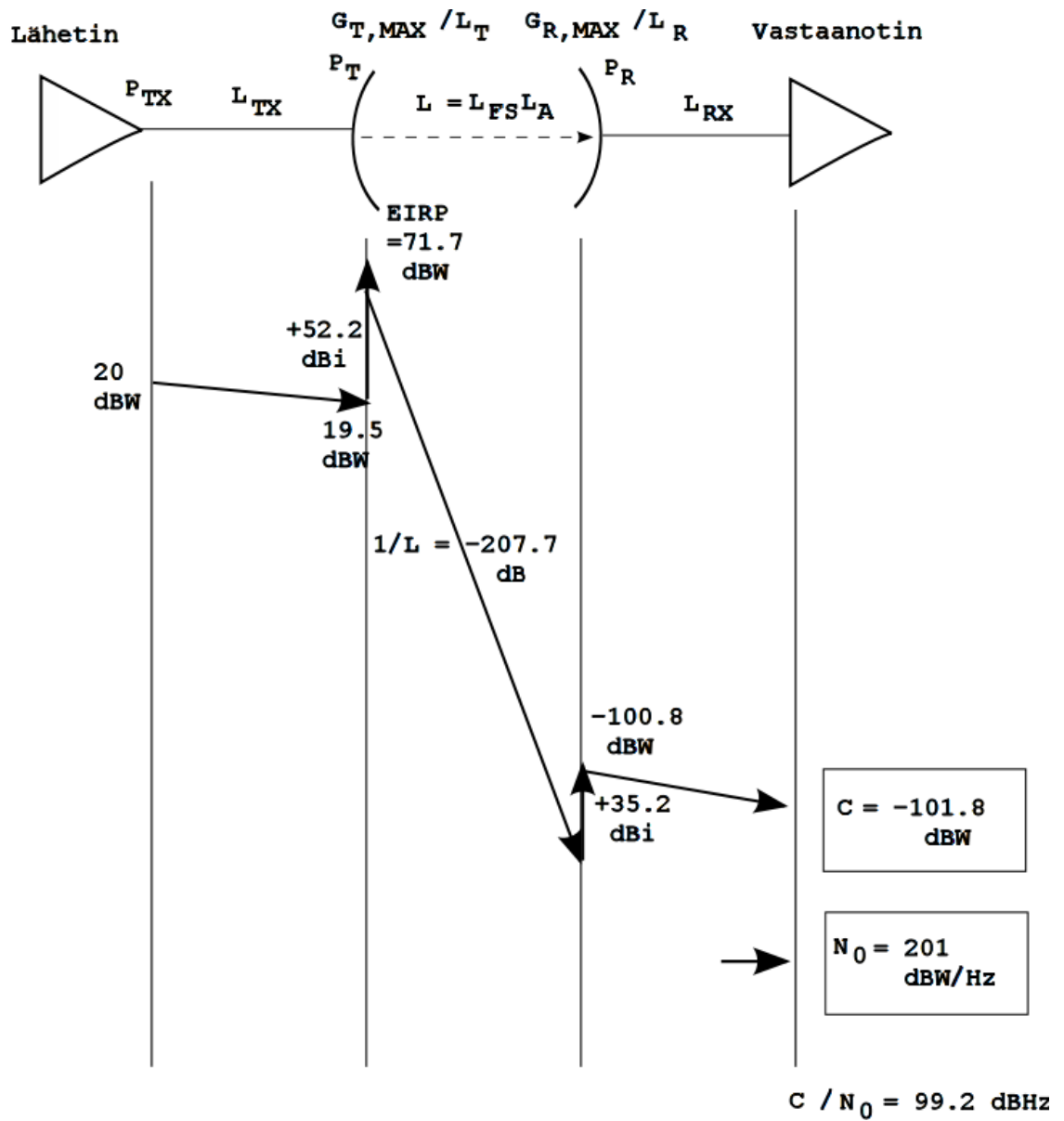
$$\frac{C}{N_{comb,if}} = \left( \left( \frac{C}{N_{up}} \right)^{-1} + \left( \frac{C}{N_{down}} \right)^{-1} + \left( \frac{C}{I} \right)^{-1} \right)^{-1} \quad (4.16)$$

joissa  $\frac{C}{I}$  on siis huomioitu häiriö. Erilaiset häiriöt voidaan huomioida lisäämällä ne kaavaan, kuten tässä esimerkissä lisättiin häiriöt yhtenä tekijänä. (DeBoy 2013)

Kuviossa 4 näkyy esimerkki linkibudjetin laskennasta uplink:ssä ilman häiriöitä. Tässä esimerkissä 20 dBW:n lähetysteho ( $P_{TX}$ ) muuntuu vastaanottimelle -101.8 dBW:n suuruiseksi vastaanotetuksi tehoksi (C). Lähettimen ja vastaanottimen välinen häviö ( $L_{TX}$ ) on 0.5 dBW:tä sekä antennin vahvistus ( $G_{T, MAX}/L_T$ ) 52.2. dBi:tä,

joiden vaikutuksesta saadaan antennilta lähteväksi signaalin tehoksi (EIRP) 71.7 dBW:tä. Ilmatien läpi kulkiessaan signaali vaimenee -207.7 dB:n verran, huomioituna vapaan tilan vaimennus ja ilmakehän vaikutukset ilman säävaikutusta ( $L = L_{FSLA}$ ). Vastaanottimen antenni vahvistaa signaalia 35.2 dbi:tä ( $(G_{R, MAX}/L_R)$ ). Vastaanotetuksi tehoksi ( $P_R$ ) antennilla saadaan -100.8 dBW:tä ja varsinaiseksi vastaanotetuksi tehoksi (C) vastaanottimella siis -101.8 dBW:tä, antennin ja vastaanottimen välisen häviön ( $L_{RX}$ ) ollessa 1 dBW:tä.  $C/N_0$  arvoksi saadaan 99.2 dBW/Hz:ä esimerkissä oletetulla 201 dBw/Hz  $N_0$  (kohinan spektrinen tiheys) arvolla.





Kuvio 4. Esimerkki uplink:n linkkibudjetin laskennasta ilman häiriötä, kirkkaalla säällä (Maral ja Bousquest 2009).

## 5 DVB-S2 ja DVB-RCS2 vaikutus linkkibudjettiin

DVB-satelliittijärjestelmässä kuten muissakin langattomissa tiedonsiirtojärjestelmissä radiokanavien määrä on rajallinen. Kanavien määrää rajoittaa fyysiset rajat, määräykset, sopimukset sekä kustannukset. Järjestelmän toimintaa tarkastellaan linkkibudjettianalyysin avulla (Maral ja Bousquest 2009). Laskemalla linkkibudjetin arvoja eli kappaleessa 4 johdettua  $C/N_0$  arvoja tiettyjen olettamusten pohjalta voidaan tarkastella järjestelmän suorituskykyä (Maral ja Bousquest 2009). Käytännössä oikeastaan  $C/N_0$  tilalla käytetään  $E_b/N_0$  arvoa, joka kuvaa tarvittavaa energiaa bittiä kohden ja tätä arvoa verrataan haluttuun virhetodennäköisyyteen (Maral ja Bousquest 2009). Itse verkon toimintaa voidaan säädellä ja analysoida näitä analyysiarvoja mittaamalla ja estimoimalla. DVB-järjestelmässä analyysin tuloksia käytetään esimerkiksi modulointi/koodaus yhdistelmän MODulation-CODing combination (MODCOD) valintaan viestin välittämiseksi (DVB Org 2013a, luku 5.1.1).

DVB-S2 (ETSI 2013) tekninen standardi tuo seuraavia artikkelien, DVB Org (2012b) sekä Morello ja Mignone (2006, luku Abstract), esittelemiä verkon toiminnan aikaiseen linkkibudjettianalyysiin perustuvia parannuksia.

- *Modulointimoodit* QPSK (Quaternary Phase Shift Keying) ja 8PSK (8-ary Phase Shift Keying) yleislähetyskäyttöön sekä heikkoon kuuluvuuteen. 16APSK (16-ary Amplitude and Phase Shift Keying) ja 32APSK (32-ary Amplitude and Phase Shift Keying), korkean  $C/N$  (signaali-kohina suhteen) vaativiin olosuhteisiin lähinnä ammattimaisiin sovelluksiin kuten uutistarjonta ja interaktiiviset palvelut.
- *Forward Error Correction (FEC)* virheenkorjausmenetelmä hyvän suorituskyvyn takaaminen myös heikoissa kuuluvuuksissa.
- *Muuntuvan koodauksen ja moduloinnin* eli Adaptive Coding and Modulation (ACM) käyttö sallii parametrin muuttamisen kehys kehykseltä vallitsevan välityspolun mukaan käyttäjäkohtaisesti, kun kyseessä yksilöllinen liikenne (unicast).
- DVB-S2 tarjoaa *taaksepäin yhteensopivuuden*. Vanhat (DVB-S mukaiset) laitteet

toimivat kuten aiemmin tarjoten uudemmille laitteille lisäkapasiteettia ja -palveluita.

DVB-RCS2 (ETSI 2012a) tekninen standardi tuo parannuksia kuten DVB-S2 esitellen uudet modulointitavat BPSK (Binary Phase Shift Keying), 8PSK ja 16QAM (16-ary Quadrature Amplitude Modulation) aiemmin tuetun QPSK:n lisäksi. Standardi määrittelee myös tarvittavat sanomarakenteet ja signaloititavat parannusten käyttöön ottamiseksi ja järjestelmän säätämiseksi dynaamisesti. Lisätty random-access (satunnainen pääsy) ominaisuus mahdollistaa tarvittavien tärkeiden sanomien välittämisen käyttäjäterminaalista myös tilanteissa, joissa terminaalilla ei ole allokoitua siirtokanavaa käytössä. (DVB Org 2012a)

Uudet standardit mahdollistavat radioresurssien tehokkaamman käytön. Linkki-budjettianalyysillä on käytännön järjestelmässä merkittävä rooli, jotta parannukset voidaan ottaa järjestelmässä dynaamisesti käyttöön. Näin voidaan muuttaa siirtopuskureiden kokoa ja rakennetta sekä aiemmin kuvattuja erilaisia signaloititapoja käytön aikana tarkoituksen mukaisesti riippuen siitä, millainen on vallitseva tiedonsiirtokyky johtuen olosuhteista siirtotiellä tietyltä käyttäjäterminaalilta järjestelmään. Joustavuus mahdollistaa myös mm. sääolosuhteiden huomioimisen linkki-budjettianalyysin yhteydessä järjestelmän muuntamiseksi dynaamisesti. (DVB Org 2012a; 2013a, luku 5.1.1) Esimerkiksi toissijaisten tietojen välittäminen voitaisiin mahdollisesti tarvittaessa ajoittaa kirkkaan sään ajanjaksoille, jolloin ne eivät vaaranna tärkeiden tietojen perille menoa. Tällaisten ns. ennustavien seikkojen huomioiminen vaatii luonnollisesti järjestelmältä enemmän kykyä laskentaan ja erilaisten algoritmien hyödyntämistä. Sillä itse linkki-budjetin laskentakin vaatii jo suunnitteluvaiheessa useita iterointiovaiheita sopivimpien parametrien löytämiseksi (Nandra, Govil ja Govil 2008).

## 6 Yhteenveto

Linkkibudjettianalyysin avulla voidaan tarkastella satelliittijärjestelmän suorituskykyä. Komponenttivalinnoilla, kuten antennin valinnalla, sekä lähetystehoa säätämällä voidaan vaikuttaa linkkibudjettiin. Näillä keinoilla voidaan kuitenkin vaikuttaa linkkibudjettiin rajallisesti. Esimerkiksi lähetysteho voidaan haluta pitää vaikkapa satelliitissa vakiona (Nandra, Govil ja Govil 2008). Toisen sukupolven DVB standardit DVB-S2 (ETSI 2013, 2012b, 2012a, 2012c) määrittelevätkin uusia ominaisuuksia enemmänkin vallitsevaan tilanteeseen sopeutumiseksi. Rajallisten radioresursien ja komponenttien kustannusten vuoksi on järkevää panostaa teknisiin määriteltyihin ja pyrkiä löytämään keinoja tehokkaampiin siirtotapoihin ja muunneltavuuteen, jotta rajalliset resurssit saadaan tehokkaammin käyttöön. Uusien ominaisuuksien hyödyntäminen perustuu linkkibudjettianalyysin tuloksiin, jonka vuoksi se on tärkeä osa satelliittijärjestelmän toiminnan ymmärtämisen kannalta. Linkkibudjettianalyysi tarvitaan yhdeksi tekijäksi tutkittaessa satelliittijärjestelmiä joko teoriaan, käytännön mittauksiin tai simulointituloksiin perustuen.

Satelliittijärjestelmän linkkibudjettia on tutkittu ja analysoitu varsin paljon. Tutkimustuloksia ja kirjallisuutta aiheeseen löytyy runsaasti. Kuitenkin DVB-S2 ja DVB-RCS2 standardiversiot ovat varsin tuoreita, eikä käytännön tutkimustuloksia niistä ole kovinkaan paljon tarjolla. Standardien mukaisia laitteita on kuitenkin jo lukuisasti markkinoilla sekä käytössä ja laitteiden yhteensopivuus voidaan varmistaa laboratorio-olosuhteissa (DVB Org 2012b, luku Market Deployment; 2012a, luku Market Deployment). Jatkotutkimukselle on yhä tarvetta liittyen linkkibudjettiin. Esimerkiksi suorituskyvyn parantamiseksi voitaisiin tutkia kulloiseenkin tilanteeseen sopivien signalointitapojen valintaa tietylle käyttäjälle eli optimaalisten algoritmien löytämistä radioresursien allokoimiseksi. Toteuttamalla nämä esimerkiksi olemassa olevista järjestelmistä mitatun tiedon pohjalta kokeilemalla joko simuloimalla erilaisia algoritmeja tai laskennallisesti. Järjestelmän maa-asemien, esimerkiksi gateway, sijoittelun suunnittelu on myös yksi mahdollinen jatkotutkimus aihe. Järjestelmän maa-asemien sijainnilla on suuri merkitys, koska sijainti vaikut-

taa siihen millainen palveluvaikutus eli kuinka laadukas lähetys tietystä paikasta voidaan taata.

## Lähteet

Atayero, A., M. Luka ja A. Alatishe. 2011. "Satellite Link Design: A Tutorial". *International Journal of Electrical & Computer Sciences IJECS-IJENS* 11 (04).

DeBoy, C. 2013. *Professional Development Short Course On: Satellite Communications Design & Engineering*. Saatavilla pdf-muodossa, [http://www.atcourses.com/sampler/sat\\_comm\\_sys\\_engineering.pdf](http://www.atcourses.com/sampler/sat_comm_sys_engineering.pdf), viitattu 20.12.2013.

Deplancq, Xavier, ym. 2005. "Link Budget Analysis For New Satellite Telecommunications Systems. The Malte Package". *The Defense Technical Information Center, DTIC ADA445220*.

DVB Org, DVB Organization. 2012a. *DVB-RCS2 Fact Sheet*. Saatavilla pdf-muodossa, [http://www.dvb.org/resources/public/factsheets/DVB-RCS2\\_Factsheet.pdf](http://www.dvb.org/resources/public/factsheets/DVB-RCS2_Factsheet.pdf).

DVB Org, DVB Organization. 2012b. *DVB-S2 Fact Sheet*. Saatavilla pdf-muodossa, [http://www.dvb.org/resources/public/factsheets/DVB-S2\\_Factsheet.pdf](http://www.dvb.org/resources/public/factsheets/DVB-S2_Factsheet.pdf).

DVB Org, DVB Organization. 2013a. *DVB Document A162; Digital Video Broadcasting (DVB); Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Guidelines for Implementation and Use of LLS: EN 301 545-2*. Saatavilla pdf-muodossa, <http://www.dvb.org/resources/public/standards/a162-DVB-RCS2-Lower-Layer-Imp-Guide.pdf>.

DVB Org, DVB Organization. 2013b. *The Digital Video Broadcasting Project (DVB) Website*. <http://www.dvb.org/>, viitattu 20.12.2013.

ETSI, European Telecommunications Standards Institute. 1997. *EN 300 421 V1.1.2: Digital Video Broadcasting (DVB); Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services*. Saatavilla pdf-muodossa, [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/300400\\_300499/300421/01\\_01\\_02\\_60/en\\_300421v010102p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300400_300499/300421/01_01_02_60/en_300421v010102p.pdf).

ETSI, European Telecommunications Standards Institute. 2009a. *ETSI EN 301 790 V1.5.1: Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for satellite distribution systems*. Saatavilla pdf-muodossa, [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/301700\\_301799/301790/01.05.01\\_60/en\\_301790v010501p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301700_301799/301790/01.05.01_60/en_301790v010501p.pdf).

ETSI, European Telecommunications Standards Institute. 2009b. *ETSI TR 101 790 V1.4.1: Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for Satellite Distribution Systems; Guidelines for the use of EN 301 790*. Saatavilla pdf-muodossa, [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/101700\\_101799/101790/01.04.01\\_60/tr\\_101790v010401p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/101700_101799/101790/01.04.01_60/tr_101790v010401p.pdf).

ETSI, European Telecommunications Standards Institute. 2012a. *ETSI EN 301 545-2 V1.1.1: Digital Video Broadcasting (DVB); Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 2: Lower Layers for Satellite standard*. Saatavilla pdf-muodossa, [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/301500\\_301599/30154502/01.01.01\\_60/en\\_30154502v010101p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301500_301599/30154502/01.01.01_60/en_30154502v010101p.pdf).

ETSI, European Telecommunications Standards Institute. 2012b. *ETSI TS 101 545-1 V1.1.1: Digital Video Broadcasting (DVB); Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 1: Overview and System Level specification*. Saatavilla pdf-muodossa, [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/101500\\_101599/10154501/01.01.01\\_60/ts\\_10154501v010101p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/101500_101599/10154501/01.01.01_60/ts_10154501v010101p.pdf).

ETSI, European Telecommunications Standards Institute. 2012c. *ETSI TS 101 545-3 V1.1.1: Digital Video Broadcasting (DVB); Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 3: Higher Layers Satellite Specification*. Saatavilla pdf-muodossa, [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/101500\\_101599/10154503/01.01.01\\_60/ts\\_10154503v010101p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/101500_101599/10154503/01.01.01_60/ts_10154503v010101p.pdf).

ETSI, European Telecommunications Standards Institute. 2013. *ETSI EN 302 307 V1.3.1: Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2)*. Saatavilla pdf-muodossa, [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/302300\\_302399/302307/01.03.01\\_60/en\\_302307v010301p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/302307/01.03.01_60/en_302307v010301p.pdf).

[//www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/302300\\_302399/302307/01.03.01\\_60/en\\_302307v010301p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/302307/01.03.01_60/en_302307v010301p.pdf).

Hausman, H. 2007. *Fundamentals of Satellite, Communications Part 2*. Saatavilla pdf-muodossa, [http://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/fundamentals\\_satellite\\_communication\\_part\\_2.pdf](http://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/fundamentals_satellite_communication_part_2.pdf), viitattu 20.12.2013.

Hausman, H. 2008. *Fundamentals of Satellite, Communications Part 1*. Saatavilla pdf-muodossa, [http://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/fundamentals\\_satellite\\_communication\\_part\\_1.pdf](http://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/fundamentals_satellite_communication_part_1.pdf), viitattu 20.12.2013.

Maral, G., ja M. Bousquest. 2009. *Satellite Communications Systems; Systems, Techniques and Technology, 5th Edition*. John Wiley & Sons. Ltd. ISBN: 978-0-470-71458-4 (H/B).

Morello, A., ja V. Mignone. 2006. "DVB-S2: The Second Generation Standard for Satellite Broad-band Services". *Proceedings of the IEEE* 94 (1): 210–227.

Nandra, A., Jivesh Govil ja Jivika Govil. 2008. "Optimization of Satellite Link Design". *SpringSim*:147–152.

TutorialsWeb. 2013. *Satellite Communication, Satellite Two-way Link Budgeting*. Saatavilla html-muodossa, <http://www.tutorialsworld.com/satcom/link-power-budget/link-power-budget-index.htm>, viitattu 20.12.2013.