

Juhani Sankari

VYÖRYMÄINEN REITITYS MONIHYPPI- SESSÄ VÄLITINVERKOSSA

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta (ITC)
Tarkastaja: Taneli Riihonen
Toukokuu 2022

TIIVISTELMÄ

Juhani Sankari: Vyörymäinen reititys monihyppyydessä välitinverkossa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Toukokuu 2022

BRN (engl. Barrage Relay Network) -teknologia on yksi MANET (engl. Mobile Ad hoc Network) -verkkojen toteutustapa. Monien muiden MANET-verkkojen tapaan BRN-verkoille asetetut tavoitteet ja käytetyt ratkaisut eroavat huomattavasti tavanomaisemmista langattomista tiedonsiirtoverkoista. Työn tavoite on selvittää BRN-teknologian toiminta erityisesti reitityksen kannalta ja selvittää sen vahvuuksia muihin verkkoihin verrattuna.

Työ jakaantuu kahteen osaan. Kirjallisuustutkimusosa esittelee BRN-verkon toimintaa sekä aiheen ymmärtämistä tukevaa teoriaa tietoverkkoihin ja langattomaan tiedonsiirtoon liittyen. Työssä havaittiin, että BRN-teknologiaa käsittelevää kirjallisuutta on saatavilla melko niukasti ja etenkin usean samanaikaisen lähetyksen tilanteita on tutkittu vain vähän. BRN-verkkojen ominaisuuksia mitataan työtä varten tehdyn simulaattorin avulla. Simuloitavia asioita ovat muun muassa solmutiheyden ja käytettävien aikaviipaleiden vaikutus verkon kattavuuteen sekä usean samanaikaisen broadcast-lähetyksen kattavuus eri solmutiheyksillä ja viiveillä.

Työssä käy ilmi, että BRN-teknologian avulla voidaan muodostaa erittäin nopeasti muovautuva verkko hyvinkin yksinkertaisella reititysmenettelyllä. Reititysmenettelystä johtuen myös verkon luotettavuus paranee solmujen yhteistoiminnan ansiosta. BRN-verkon etuja ovat hyvä luotettavuus, lyhyet latenssit sekä hyvä skaalautuvuus broadcast-lähetyksillä. Vaikka broadcast-lähetykset ovat tyypillisin lähetystyyppi BRN-verkoissa, onnistuu *unicast* -ja *multicast* -lähetyksen välittäminen hallitujen solmuryhmien avulla. Kirjallisuustutkimuksen ja simulaatioiden perusteella usean samanaikaisen *broadcast* -lähetyksen välittäminen on yksi BRN-teknologian merkittävimmistä haasteista. Simuloinneissa käy ilmi, että ilman vuoronhallintaa kaksi samanaikaista lähetystä voi laskea lähetyksen kattavuutta merkittävästi. Työssä käy myös ilmi, että verkon koolla ja etenkin rakenteella on valtava vaikutus sen ominaisuuksiin. BRN-verkot ovatkin parhaimmillaan juuri niissä olosuhteissa ja sovellutuksissa, joita ajatellen se on kehitetty ja verkon suorituskyky voi jäädä vaatimattomaksi muissa tilanteissa tai eri mittareilla arvioituna.

Avainsanat: BRN, MANET, langaton tiedonsiirto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. LANGATON TIEDONSIIRTO	3
2.1 OSI-malli	3
2.2 Verkkotopologia ja reititys	4
2.3 Langattoman verkon häiriölähteet	6
2.4 Monikäyttötekniikat.....	7
2.5 MANET	10
3. BARRAGE RELAY NETWORK.....	12
3.1 Reititys	12
3.2 Solmujen yhteistoiminta	13
3.3 Broadcast-lähetykset.....	14
3.4 Hallitut solmuryhmät.....	18
3.5 Usean lähteen vuoronjako.....	19
4. SIMULAATIOTULOKSET	21
4.1 Reitityksen mallintaminen.....	21
4.2 Solmujen tiheyden vaikutus lähetyksen kattavuuteen.....	22
4.3 Usean lähettäjän tilanne ilman vuoronhallintaa.....	23
5. YHTEENVETO	27
6. LÄHDELUETTELO	28

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CLC	Confirmation Logical Channel
CTS	Clear to Send
D-BF	Distributed Beamforming
DLC	Data Logical Channel
LLC	Logical Link Control
MAC	Medium Access Control
MANET	Mobile Ad-hoc Network
OSI	Open Systems Interconnection
PTT	Push to Talk
RLC	Request Logical Channel
RTS	Request to Send
TDMA	Time Division Multiple Access

1. JOHDANTO

MANET-verkot (engl. Mobile Ad hoc Network) ovat nimensä mukaisesti liikuteltavista solmuista ja päätelaitteista koostuvia verkkoja, jotka voidaan perustaa minne tahansa ilman olemassa olevaa verkkoinfrastruktuuria. MANET-verkkojen suosio on ollut kasvussa viime vuosien aikoina. Luotettavalle ja helposti perustettavalle verkolle on ollut kysyntää muun muassa sotilaskäytössä (engl. Tactical MANET). Sotilaskäytön asettamat vaatimukset eroavat huomattavasti esimerkiksi monelle tutuista langattomista lähiverkoista (engl. Wireless Local Area Network) ja muista tavanomaisemmista verkoista. Tyypillisesti vaatimukset liittyvät esimerkiksi verkon luotettavuuteen, viiveisiin, käyttäjämääriin ja verkon kapasiteettiin. Ongelmana on kuitenkin se, että kaikkien tavoitteiden samanaikainen saavuttaminen on ainakin toistaiseksi ollut mahdotonta, jonka takia eri MANET-toteutuksilla on ollut hyvinkin erilaisia toteutuksia ja ominaisuuksia.

Niin kutsuttu BRN (engl. Barrage Relay Network) on TrellisWaren kehittämä MANET-toteutus, joka on suunniteltu etenkin luotettavaa tiedonsiirtoa, pientä latenssia sekä suurta kaikille verkon laitteille reititettävien lähetysten, eli *broadcast*-lähetysten, kapasiteettia edellyttäviin sovellutuksiin myös erittäin haastavissa olosuhteissa. [1] Muita Tactical MANET -verkon toteutuksia ovat esimerkiksi kotimaisen Bittiumin TAC WIN sekä Persistent systemsin Wave Relay-järjestelmä.

Tässä työssä selvitetään, miten BRN-teknologia toimii, mitä haasteita sillä on ja millaisia ratkaisuja ongelmia varten on kehitetty etenkin reitityksen ja eri lähetystyyppien suhteen. Lisäksi BRN-verkkoja simuloidaan Python-simulaattorilla, jonka avulla voidaan visualisoida viestin etenemistä verkossa sekä simuloida joitakin verkon ominaisuuksia erilaisilla parametreilla. Työssä esitetään myös joitakin ominaisuuksiltaan yhteneväisiä teknologioita sekä niiden eroavaisuuksia.

Kirjallisuuskatsauksen ja simulointien perusteella tulokseksi saatiin se, että BRN-verkot soveltuvat erittäin hyvin juuri niihin sovellutuksiin, joita varten ne on suunniteltu. BRN-teknologian arviointi perinteisillä verkon suorituskyvyn mittareilla ei myöskään anna oikeaa kuvaa sen ominaisuuksista sovellutusten erilaisuudesta johtuen. Simuloinneissa tuli myös ilmi BRN-verkon rakenteen suuri vaikutus sen ominaisuuksiin etenkin usean samanaikaisen lähetyksen tilanteissa.

Luvussa 2 käydään läpi työn kannalta oleellista teoriaa sekä tutustutaan joihinkin yleisiin langattoman tiedonsiirron menetelmiin. Samalla esitellään myös joitakin toiminnallisuuksiltaan osittain yhteneväisiä teknologioita. Luvussa 3 kuvataan tarkemmin BRN-teknologian toimintaa yleisesti sekä tuodaan esille joitakin poikkeuksellisia tai muuten oleellisia ratkaisuja. Luvussa 4 kerrotaan työtä varten tehdyn simulaattorin toiminnasta sekä sillä suoritetuista simuloinneista ja niiden tuloksista.

2. LANGATON TIEDONSIIRTO

Tässä luvussa esitetään joitakin yleisiä langattomaan tiedonsiirtoon liittyviä menetelmiä ja perusperiaatteita. Luvun tavoitteena on pohjustaa BRN-verkkojen toiminnalle oleellisia toimintoja sekä mahdollisia poikkeavuuksia moniin toimintatavaltaan tyypillisempiin verkkoihin verrattuna.

2.1 OSI-malli

BRN-teknologiaa käsittelevässä kirjallisuudessa [2] [3] [4] on mainittu usein, että teknologiaa koskevat ratkaisut ovat painottuneet vahvasti niin kutsutulle OSI-mallin fyysiselle ja siirtokerrokselle, joita käsitellään seuraavaksi. Poikkeuksellista on myös se, mitä toimintoja edellä mainituille kerroksille on integroitu muun muassa reitityksen suhteen.

Tietoverkkojen toiminnalliset osat voidaan jakaa osiin perinteisen protokolla-ajattelun avulla. Protokollat eli yhteiskäytännöt ovat käytäntöjä tai standardeja, jotka määrittelevät tietoverkon osien toiminnan. OSI (engl. Open Systems Interconnection) -viitemalli kuvaa eri tiedonsiirtoprotokollien yhteistoimintaa seitsemän kerroksen avulla. Lisäksi jokaisella kerroksella voi olla alikerroksia. Kerrosmallin ajatuksena on, että kukin kerros käyttää alemman kerroksen palveluita ja tarjoaa omia palveluitaan ylemmälle kerrokselle. [5] Alla on kerrottu tarkemmin kolmesta alimmasta kerroksesta, jotka ovat oleellisia myöhemmin esiteltävien työn osien yhteydessä, sillä lähes kaikki BRN-teknologian ratkaisut sijoittuvat siirtoyhteyskerrokselle. OSI-mallin kerrokset on esitetty kuvassa 1.

Fyysinen kerros vastaa nimensä mukaisesti fyysisestä siirtotiestä ja sen kautta vastaanotetun signaalin muuntamisesta digitaaliseksi. Fyysisen kerroksen ominaisuuksia ovat muun muassa verkon topologia ja lähetysnopeus. Vastaavasti fyysisellä tasolla toimivia verkon laitteita ovat muun muassa toistimet ja keskittimet. BRN-teknologian kannalta oleellisia fyysisen kerroksen toimintoja ovat muun muassa aikatazon synkronointi laitteiden välillä, sekä solmujen yhteistoiminta [6].

Siirtoyhteyskerros vastaa viestin kulkeutumisesta laitteelta toiselle virheettömästi. Siirtokerros on jaettu kahteen alakerrokseen, loogisen siirtotien ohjaus (engl. Logical Link Control) - ja varauskerrokseen (engl. Medium Access Control). Siirtokerros pakatoi fyysiseltä kerrokselta saamansa datan kehyksiin ylempiä kerroksia varten. Siirtokerroksen muita yleisiä tehtäviä ovat muun muassa virheenkorjaus (LLC), fyysisen osoitteen määrittäminen sekä pääsynhallinta (MAC). Siirtokerroksen laitteita ovat esimerkiksi kytkimet ja sillat. BRN-verkoissa LLC-kerroksella tehdään virheentarkastelu vastaanotetulle viestille ja MAC-kerroksella hallitaan siirtoteiden pääsyhallintaa aikajakokanavoinnin ja hallittujen solmuryhmien avulla, kuten luvuissa 3.1 ja 3.4 on esitelty.



Kuva 1 OSI-mallin kerrokset

Huomioitavaa on, että OSI-malli ei ole tarkka tai yksiselitteinen, vaan se toimii viitemallina toiminnallisuuksien jaottelun apuna. Eri protokollat voivat muun muassa toimia usealla eri kerroksella tai vain yksittäisen kerroksen alakerroksena. [3]

2.2 Verkkotopologia ja reititys

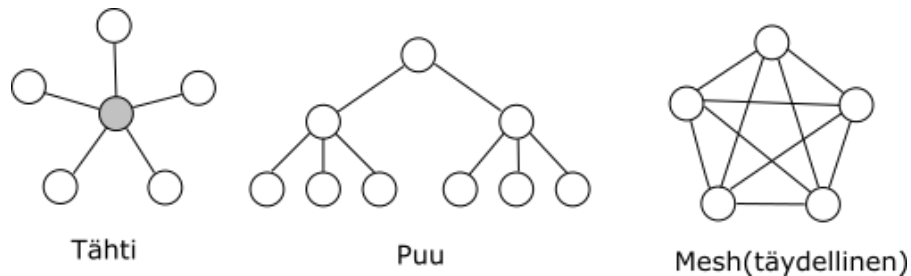
Verkkotopologialla tarkoitetaan verkon rakennetta. Kun kaksi laitetta on yhdistetty toisiinsa, on niiden välillä yhteys. Kaksi tai useampi verkkoon yhdistetty laite muodostavat verkon topologian. Verkoissa on päätelaitteiden lisäksi myös muita laitteita, kuten reitittämiä, tukiasemia, siltoja ja kytkimiä. Yhteyksien välissä ja päissä olevia laitteita kutsutaan solmuiksi.

Yleisimpiä verkkotopologioita ovat muun muassa väylä, tähti, puu, rengas ja mesh, joista langattomiin verkkoihin soveltuvia ovat lähinnä tähti, puu ja mesh-topologiat. Langattomien verkkojen verkkotopologioita on havainnollistettu kuvassa 2.

Tähtitopologiassa kaikki verkon solmut ovat yhdistyneenä yhteen keskussolmuun, joka voi olla luonteeltaan joko aktiivinen tai passiivinen. Keskussolmuna toimiva laite voi välittää päätelaitteelta saamansa viestin haluttuihin haaroihin ja oikeille vastaanottajille. Tähtitopologian etuna on yksinkertainen rakenne ja keskitetty hallinta, joka helpottaa verkon ylläpitoa ja hallinnointia. Haittapuolena on koko verkon tiedonsiirron riippuvuus keskussolmusta. Jos yksittäisen päätelaitteen yhteys keskussolmulle katkeaa, eristyy se kokonaan verkosta. Lisäksi koko verkko lakkaa toimimasta, mikäli keskussolmu hajoaa tai menettää yhteyden kaikkiin päätelaitteisiin. [5, p. 20]

Mesh-topologia voidaan jakaa kahteen alaluokkaan, täydelliseen ja osittaiseen mesh-topologiaan. Täydellisessä mesh-topologiassa jokaisella verkon laitteella on yhteys kaikkiin muihin verkon laitteisiin. Osittaisessa mesh-topologiassa näin ei ole, vaan joidenkin laitteiden väliltä voi puuttua yhteys. Näitä alaluokkia yhdistää kuitenkin se, ettei kumpaakaan topologiaa noudattavassa verkossa tarvita erillisiä keskussolmuja. Mesh-topologian etuna on esimerkiksi tähtitopologiaan verrattuna riip-

pumattomuus yksittäisistä laitteista tai yksittäisistä yhteyksistä laitteiden välillä. Vastaavasti sen haittapuolena on hankalampi hallinnointi ja monimutkaisuus etenkin täydellisen mesh-topologian tapauksessa.



Kuva 2 Yleisiä verkkotopologioita

Käytännössä monet verkot koostuvat useista eri topologiaa noudattavista osista eli ovat hybrideitä. Esimerkiksi puutopologia on yksi esimerkki hybriditopologiasta, sillä se voi koostua väylä ja tähtitopologiaa noudattavista osista. [5, p. 20] BRN-verkkojen tapauksessa topologia on dynaaminen, eli se voi muuttua jatkuvasti. Verkon rakenne kuitenkin muistuttaa mesh-topologiaa, sillä kaikki solmut voivat lähettää viestejä toisilleen. Tästä on kerrottu tarkemmin luvussa 3.1. Toisaalta BRN-verkoilla on myös kyky muodostaa jononaisia verkkorakenteita hallittujen solmuryhmien avulla.

Ad hoc -verkolla tarkoitetaan verkkoa, jolla on hajautettu hallinta sekä kyky muodostaa toimiva verkko itsenäisesti, ilman olemassa olevaa infrastruktuuria. Jokainen ad hoc -verkon solmu voi lähettää ja vastaanottaa itsenäisesti sekä tarvittaessa lähettää edelleen vastaanottamiaan lähetyksiä. Ad hoc-verkoissa lähetys voi siis kulkea usealle vastaanottajalle usean laitteen kautta, eikä lähettäjällä ja vastaanottajalla tarvitse olla suoraa yhteyttä keskenään. [8] Mesh-verkko ei siis välttämättä ole ad hoc-verkko, koska sen laitteilla ei välttämättä ole kykyä välittää vastaanottamaansa viestiä eteenpäin.

Verkkotopologian lisäksi yksittäisen viestin etenemiseen vaikuttaa myös sen lähetystyyppi. Verkoissa kulkevat lähetykset voidaan jakaa kolmeen pääluokkaan lähettäjän ja vastaanottajien mukaan. Useissa tavanomaisissa verkoissa lähetystyypit toimivat OSI-mallin kuljetuskerroksella, mutta BRN-verkoissa reititys tapahtuu poikkeuksellisesti fyysisellä ja verkkoyhteyskerroksella.

Suuri osa tavanomaisissa tietoliikenneverkoissa kulkevista viesteistä on *unicast*-, eli täsmälähetyksiä. Täsmälähetyksellä on nimensä mukaisesti vain yksi lähettäjä ja yksi määritetty vastaanottaja. *Unicast*-lähetyksiä käytetään muun muassa tavanomaisissa lähiverkoissa tietojen välittämiseen palvelimelta päätelaitteelle.

Multicast-, eli ryhmälähetys on lähetys, jolla on monta vastaanottajaa. Vastaanottajina ei kuitenkaan välttämättä ole kaikkia kohdeverkon laitteita. *Multicast*-lähetyksiä voidaan myös käyttää esimerkiksi yksittäisen videolähetyksen suoratoistolle useassa valitussa laitteessa. *Broadcast*-, eli yleislähetyksellä on *multicast*-lähetyksestä poiketen vastaanottajina ovat kaikki samassa verkossa

olevat laitteet, eli välitettävä viesti välitetään jokaiselle verkon päätelaitteelle. Tavanomaisten verkkojen tapauksessa tämä voi rasittaa verkkoa. Tämän takia yleislähetysten määrää pyritään minimoimaan tavanomaisissa verkoissa. [7] *Broadcast*-lähetykset ovat BRN-verkkojen tyypillisin lähetysmuoto, eivätkä ne rasitu niiden käytöstä tavanomaisien verkkojen tapaan.

2.3 Langattoman verkon häiriölähteet

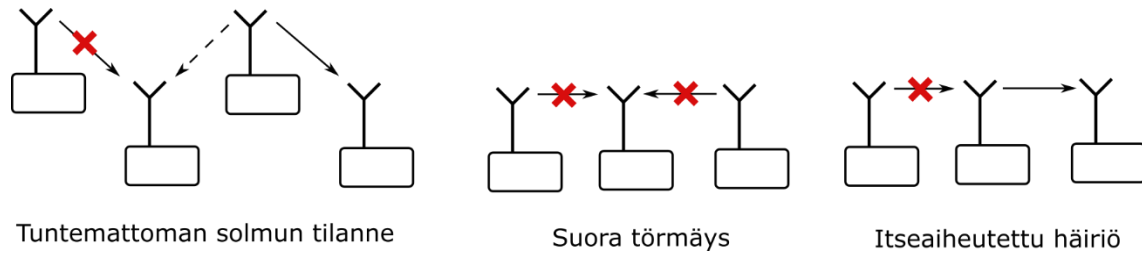
Verrattuna langalliseen tiedonsiirtoon, langattomassa verkossa häiriölähteiden määrä on huomattavasti suurempi. Tässä luvussa esitellään joitakin yleisimpiä häiriölähteitä sekä häiriölähteitä, joiden vaikutusta on pyritty vähentämään BRN-tekniikan ratkaisulla.

Vaimenemisella tarkoitetaan signaalitason alenemista lähettimen ja vastaanottimen välisen etäisyyden funktiona. Esimerkiksi vapaan tilan etenemismallin mukaan signaalitehon voidaan approksimoida pienenevän etäisyyden neliön funktiona [9, p. 32]. Vastaanottotehon kasvattaminen on mahdollista muun muassa suunta-antennien ja suuremman lähetystehon avulla. Suuntaava antenni suuntaa nimensä mukaisesti signaalitehoa haluttuihin suuntiin, mutta samalla muihin suuntiin lähetetty teho pienenee. Tämän takia suunta-antennit ovat harvoin toimivia liikkuvien laitteiden kohdalla. Lähetystehon kasvattaminen taas lisää monitie-etenemisestä aiheutuvia häiriöitä, sekä luonnollisesti kasvattaa laitteen virrankulutusta, joka saattaa rajoittaa laitteen liikuteltavuutta.

Toinen signaalitasoon vaikuttava tekijä on häipyminen, joka tarkoittaa suurten esteiden aiheuttamaa vaihtelua signaalitasossa. Esimerkiksi rakennukset tai maastonmuodot lähettimen ja vastaanottimen välissä heikentävät usein vastaanottotehoa.

Monitie-etenemisellä tarkoitetaan signaalien kulkemista useaa eri reittiä pitkin ja sitä syntyy esimerkiksi signaalien heijastumisen, taittumisen tai sirottumisen seurauksena. Koska reittien pituus vaihtelee, voivat signaalit saapua vastaanottimeen eri aikoihin, joka hankaloittaa viestin vastaanottamista. Monitie-etenemistä esiintyy esimerkiksi asutuskeskuksissa, joissa on paljon pintoja, joista lähetetty signaali voi heijastua. [9, p. 64]

Myös verkossa samanaikaisesti lähetettävät lähetykset voivat häiritä toisiaan. Pällekkäiset lähetykset, eli törmäykset voivat aiheuttaa kolmenlaisia törmäyksiä: suorassa törmäyksessä vastaanotin vastaanottaa samanaikaisesti useaa eri lähetystä samalta kanavalla. Itseaiheutetussa häiriössä solmu lähettää itse samaan aikaan, kun sen pitäisi vastaanottaa toista lähetystä. Tuntemattoman solmun tilanteessa kahdella verkon solmulla ei ole yhteyttä toisiinsa, mutta molemmilla on yhteys samaan solmuun. Tällöin voi syntyä törmäyksiä, koska reunasolmut eivät tiedä toistensa mahdollisista lähetyksistä. Eri törmäystyyppisiä on esitelty kuvassa 3.



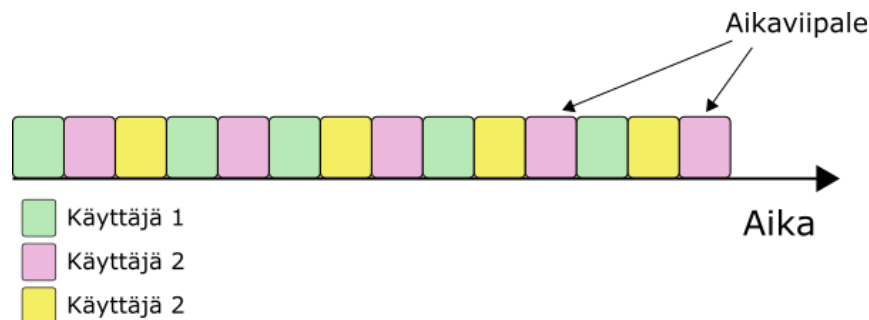
Kuva 3 Lähetyksien törmäystyyppejä langattomassa verkossa

BRN-tekniologiassa edellä mainittuja häiriöitä on ratkaistu muun muassa fyysisen ja siirtoyhteyskerroksen ratkaisulla sekä reitityksen avulla, sekä usean lähteen vuoronhallinnan avulla. Näistä on kerrottu tarkemmin luvuissa 3.2 ja 3.5. Lisäksi törmäysten huomiointi on oleellista simulaattorin toiminnan kannalta.

2.4 Monikäyttötekniikat

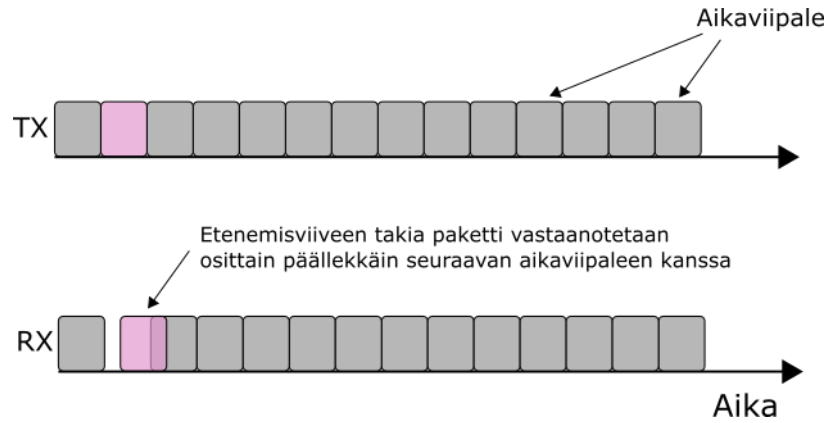
Monikäytöllä tarkoitetaan siirtokanavan jakamista usealle käyttäjälle. Menetelmiä kanavan jakamiselle on useita ja useamman tekniikan käyttäminen samanaikaisesti on myös mahdollista. Yleisimpiä monikäyttötekniikoita ovat TDMA, SDMA, FDMA ja CDMA. [9]

BRN-verkoissa viestin etenemistä sekä eri solmujen lähetyksen vuoronjakoa hallitaan aikajakokanavoinnilla eli TDMA (engl. Time Divisional Multiple Access) -tekniikalla, jossa kanava jaetaan aikatasossa aikaväleiksi, eli aikaviipaleiksi. Viipaleiden pituus voi olla vakiomittainen tai se voidaan määrittellä tarvepohjaisesti. Tavallisesti kaikki kanavaa käyttävät laitteet vuorottelevat ja lähettävät vain niille annetuissa aikaviipaleissa. [9, p. 457] Kolmijakoisen aikajakokanavan toiminta on esitetty kuvassa 4. BRN-verkossa aikajakokanavointi toimii samalla periaatteella, mutta käyttäjien sijaan resurssit jaetaan samaan aikaan lähetettäville solmuryhmille, kuten luvussa 3.1 on kuvattu.



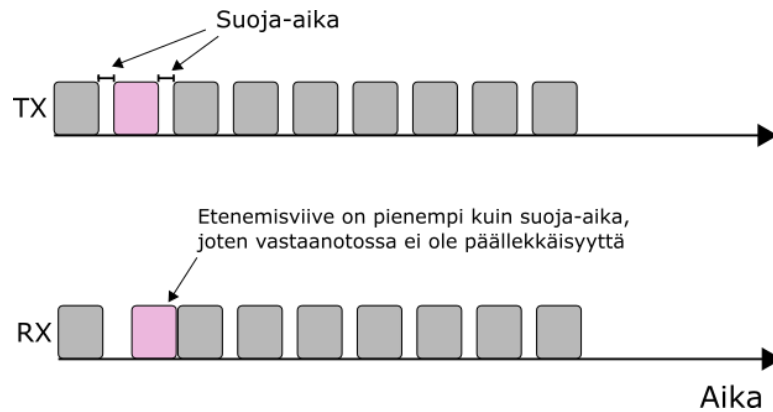
Kuva 4 Aikajakokanavointi

Aikajakokanavoinnin ongelmia ovat etenkin aikataason synkronointi ja etenemisviiveet. Etenemisviiveellä tarkoitetaan aikaa, joka signaalilla kuluu matkalla lähettimeltä vastaanottimelle. Etenkin verkoissa, joilla on laaja peittoalue, poikkeavuudet etenemisviiveissä voivat olla merkittäviä. Tämän seurauksena vastaanottaja saattaa vastaanottaa eri aikaviipaleissa lähetetyt signaalit osittain päällekkäin, jolloin viestin virheetön vastaanotto ei onnistu. Etenemisviivettä voidaan hallita esimerkiksi suoja-ajalla ja aikaennakolla. Etenemisviiveen vaikutusta on havainnollistettu kuvassa 5.



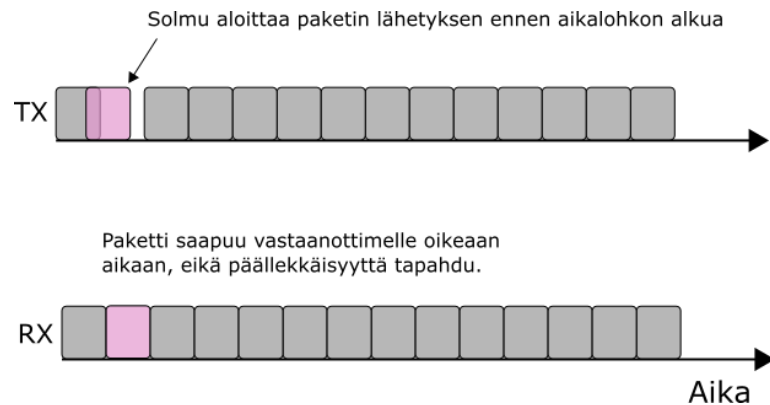
Kuva 5 Etenemisviiveen vaikutus vastaanottoon

Suoja-ajalla tarkoitetaan ylimääräistä aikajaksoa aikaviipaleiden välissä. Suoja-ajalla päästään hyviin tuloksiin, kunhan verkon etenemisviiveet ovat maltillisia, eli verkossa olevat laitteet ovat melko lähellä toisiaan. Suoja-ajan haittapuolena on kanavan kapasiteetin pienentyminen, sillä suoja-ajan pidentyessä varsinainen, tiedonsiirtoon käytettävän ajan pituus lyhenee. Suoja-ajan toimintaa on havainnollistettu kuvassa 6.



Kuva 6 Suoja-aika

Kuten kuvassa 7 on esitetty, aikaennakon avulla pyritään ennakoimaan etenemisviive siten, että paketti lähetetään jo ennen aikaviipaleen alkua, mutta viiveestä johtuen se saapuu vastaanottimelle oikeaan aikaan.



Kuva 7 Aikaennakko

Kuten edellä on mainittu, aikasynkronointi eri lähettäjien välillä on toinen aikajakokanavoinnin yleisimmistä ongelmista. Aikaennakosta tai suoja-ajoista ei välttämättä ole hyötyä, jos verkon laitteiden kellot eivät ole samassa ajassa. Käytännössä aikasynkronointi voidaan toteuttaa esimerkiksi pääasiallisena vastaanottimena toimivan tukiaseman lähettämällä aikatiedolla, jonka perusteella verkon laitteet synkronoivat omat kellonsa. Aikatiedon lähettäminen kuitenkin lisää ylimääräistä liikennettä verkossa ja laskee siten sen kapasiteettia. [9, p. 457]

BRN-verkkojen tapauksessa on usein tarvetta vain aikasynkronoinnille, sillä BRN-verkot eivät ole levittäytyneet maantieteellisesti kovinkaan suurelle alueelle suunnitelluista käyttökohteista johtuen.

Siirtokanavan jakoon on olemassa myös muita menetelmiä. FDMA (engl. Frequency Division Multiple Access) -tekniikka, jolla kanava jaetaan taajuustasossa eli kanta-aaltotaajuuksille. Koodijakokanavoinnilla kanava voidaan jakaa ohjelmallisesti esimerkiksi suorasekvennoinnin tai taajuushypinnän avulla. Menetelmän etuna on se, että koko taajuuskaista voidaan käyttää hyödyksi sekä se, että taajuushypintä hankaloittaa lähetyksen salakuuntelua ja häirintää. [9] Taajuushypintää voidaan käyttää esimerkiksi BRN-teknologian yhteydessä, kuten julkaisuissa [1] ja [6] on esitetty.

2.5 MANET

MANET-verkot ovat nimensä mukaisesti langattomia ad hoc -verkkoja, jotka koostuvat myös käytön aikana liikuteltavista solmuista. Kuten luvussa 2.2 on mainittu, ad hoc -verkolla tarkoitetaan verkkoa, joka ei tarvitse erillistä infrastruktuuria toimiakseen, vaan verkon laitteet voivat toimina päätelaitteina ja reitittimenä, jolloin verkon hallinta on hajautettu. [10] MANET-verkon rakenne on usein dynaaminen ja solmujen liittyminen tai poistuminen verkosta on verrattain yksinkertaista ja verkkotopologia mukautuu muutoksiin automaattisesti. [2] MANET-verkon etuna on automaattisesti muodostuva verkon rakenne ja sen muovautuminen olosuhteiden mukaan. Hajautetun rakenteensa ansiosta MANET-verkot ovat muiden ad hoc -verkkojen tapaan kestäviä myös yksittäisen solmun häviämisen tai rikkoutumisen suhteen. Tavanomaisessa verkossa yksittäisen reitittimen hajoaminen voi tarkoittaa, ettei reitittimeen aiemmin yhdistyneillä solmuilla ole enää pääsyä verkkoon. MANET-verkot ovat ad hoc -verkkoja, joten verkon laitteet voivat tarvittaessa toimia myös reitittimenä, eikä vastaavaa ongelmaa ole.

MANET-verkot voidaan jakaa rakenteensa mukaan kahteen pääryhmään. Yhden yhteysvälin verkoissa solmut voivat olla yhteydessä vain niihin solmuihin, jotka ovat lähetyksen kantaman sisällä. Usean hypyn verkoissa yksittäinen solmu voi olla yhteydessä useamman yhteysvälin päässä oleviin solmuihin, jolloin yhteys koostuu lähettäjän ja vastaanottajan lisäksi myös lähetystä välittävistä välisolmuista. Usean hypyn verkkojen haittapuolena on reitityksen monimutkaisuus verkkotopologian muutoksista johtuen. [10]

MANET-verkot voidaan luokitella myös verkkotopologian hierarkian mukaan. Yksitasoisessa hierarkiassa kaikki solmut ovat keskenään toiminnallisesti identtisiä. Hierarkkisessa verkossa solmut on jaettu normaaleihin ja hallinnoiviin soluihin. Hierarkkisissa verkoissa muodostuu solmuryhmiä, joiden välillä tieto kulkee vain hallinnoivien solujen kautta. Tällöin yksittäisen soluryhmän tietoliikenne ei pääse tahattomasti leviämään koko verkkoon. [10] BRN-verkossa samankaltainen ryhmitely voidaan luoda hallinnoitujen solmuryhmien avulla, kuten luvussa 3.2. on kuvattu.

Hajautettu hallinta ja verkkorakenteen dynamiikka tuovat mukanaan myös haasteita. Monissa MANET-toteutuksissa naapurisolmujen tunnistamiseen, synkronointiin ja muihin verkon hallintaan tarvittavien tietojen osuus voi kasvaa merkittävän suureksi pienentäen lähetyksen hyötykuormaa ja siten verkon kapasiteettia. MANET-verkkojen reititysprotokollia onkin tutkittu ja kehitetty paljon, mutta monet ratkaisut ovat keskittyneet vain tiettyihin tavoitteisiin muiden verkon ominaisuuksien kustannuksella. Toistaiseksi yleispäteviä ratkaisuja ei ole löydetty. Lisäksi mobiliteetin säilyttäminen aiheuttaa rajoitteita muun muassa laskenta- ja lähetystehon suhteen. [10]

MANET-verkoissa kulkeva tietoliikenne on tyypillisesti PTT (engl. push to talk) äänilähetyksiä tai muutaman lähteen videokuvan suoratoistoa *broadcast*-lähetyksillä. Tämä erottaa MANET-verkon monista tavanomaisista verkoista, joissa lähetykset ovat usein painottuneet *unicast*-lähetyksiin. [2] Tietoliikenne ja sen määrä vaihtelee kuitenkin selvästi sovellutuksesta riippuen.

3. BARRAGE RELAY NETWORK

Barrage Relay Network (BRN) on yksi MANET-verkon toteutustavoista. Kuten monet muutkin MANET-verkot, myös BRN on kehitetty etenkin viranomais- ja sotilaskäyttöä sekä olosuhteita ajatellen. Edellä mainituille olosuhteille tyypillistä onkin siirtoteiden ruuhkaisuus, häiriöisyys, sekä mahdollisesti haastava ja dynaaminen siirtotieympäristö. Hyviä esimerkkejä käyttökohteista ja sovellutuksista ovat julkaisussa [6] esitetyissä testeissä käytetty lentotukialus ja julkaisussa [9] esitellyt miehittämättömät viranomaiskäyttöön tarkoitetut laitteet. Suunnitelluille käyttäjäryhmille tärkeitä ominaisuuksia ovat etenkin pieni latenssi ja luotettava tiedonsiirto kaikissa olosuhteissa, joita ajatellen BRN on erityisesti kehitetty.

Perusrakenteeltaan BRN-verkko on usean yhteysvälin MANET-verkko, jossa kaikki solmut voivat tarvittaessa yhdistyä toisiinsa. Suurin ero muihin MANET-verkkoihin on reititys, sillä BRN-verkoissa solmut eivät ole tietoisia verkon tilasta tai ympäröivistä naapurisolmuista, vaan tekevät reitityspäätökset itsenäisesti luvussa 3.1 kuvatulla tavalla. Yksinkertaisen reititysmenetelmän ansiosta BRN-verkot muovautuvat erittäin hyvin ympäristön muutoksiin, eikä verkon ylläpitoon tarvittava datamäärän välittäminen vie isoa osaa verkon tiedonsiirtokapasiteetista. Lisäksi BRN-verkkojen kapasiteetin skaalautuvuus *broadcast*-lähetyksillä käyttäjämäärän suhteen on erittäin hyvä [8]. Reititysmenetelmän haittapuolena ovat muun muassa *unicast*- ja *multicast*-lähetyksien välittäminen sekä usean samanaikaisen lähetyksen hallinta. BRN-verkoille tyypillisin lähetystyyppi onkin *broadcast*-lähetykset. Tyypillisiä lähetyksilajeja ovat esimerkiksi *broadcast*-tyyppiset PTT-äänilähetykset ja muutama lähteen videosuoratoisto sekä rajattu määrä *unicast*-lähetyksiä esimerkiksi tekstiviestien muodossa. [12]

3.1 Reititys

BRN-verkon erikoisuus moniin muihin langattomiin verkkoihin verrattuna on sen reititys, joka perustuu karkeaan aikataason synkronointiin, sekä aikajakokanavoinnilla hallittavaan vyörymäiseen viestin etenemiseen. BRN-verkon solmulla ei monista muista MANET-toteutuksista poiketen ole tietoa naapureistaan tai siirtotien ominaisuuksista. [8] *Unicast*- ja *multicast*-lähetyksien tapauksessa viestien leviämistä rajoitetaan hallittujen solmuryhmien avulla, kuten luvussa 3.4 on esitetty.

Yksinkertaisuudessaan BRN-verkon reititystä voidaan luonnehtia toistinmaisiksi, sillä yksittäinen solmu lähettää vastaanottamansa viestin muuttumattomana eteenpäin reunaehtojen täytyessä. Yksittäisen solmun tekemä reitityspäätös perustuu vastaanotetun viestin oikeellisuuden arviointiin ja siihen on kirjallisuudessa esitetty useita menetelmiä, kuten [6, p. 4] esitetty virheentunnistuskoodi. Virheentunnistuskoodin avulla vastaanoton onnistuminen pystytään tarkastamaan sen avulla, onnistuuko vastaanotetun viestin purkaminen. Jos viestin purkaminen onnistuu, eikä solmu

ole vastaanottanut kyseistä viestiä vielä aiemmin, lähettää se sen eteenpäin seuraavassa aikaviipaaleessa. Lisäksi solmun tekemään reitityspäätökseen voi vaikuttaa hallitun solmuryhmän tapauksessa sille annettu rooli, sillä *buffer*-tilassa olevat solmut eivät välitä solmuryhmän sisältä tulevia viestejä sen ulkopuolelle. Hallituista solmuryhmistä on kerrottu tarkemmin luvussa 3.4.

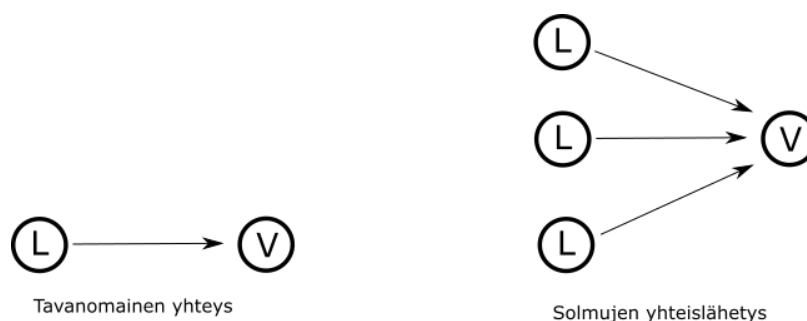
Yksittäisen solmun reitityslogiikan lisäksi viestin etenemistä hallitaan aikajakokanavoinnin ja aikasykronoinnin avulla. [12] Aikasykronointia tarvitaan samanaikaisten lähetysten ja luvussa 3.2 esiteltyjen yhteislähetysten aikaansaamiseksi. Aikajakokanavoinnilla aikaansaadaan vyörymäinen eteneminen, tahdistetaan samanaikaiset lähetykset sekä estetään päällekkäisten häiritsevien lähetysten syntyminen.

Käytännössä viestin eteneminen toimii siis siten, että vastaanotettuaan viestin onnistuneesti, solmu lähettää sen eteenpäin seuraavassa aikaviipaaleessa edellä mainittujen ehtojen täytyessä. Aikaviipaaleet on jaettu kehyksiin, jossa kussakin tulee olla vähintään kolme aikaviipaletta. Solmu saa lähettää verkkoon uuden viestin vain kerran yhden aikajakokehyyksen aikana. Viestin etenemistä eri tilanteissa kuvataan tarkemmin luvuissa 3.3 ja 3.4.

3.2 Solmujen yhteistoiminta

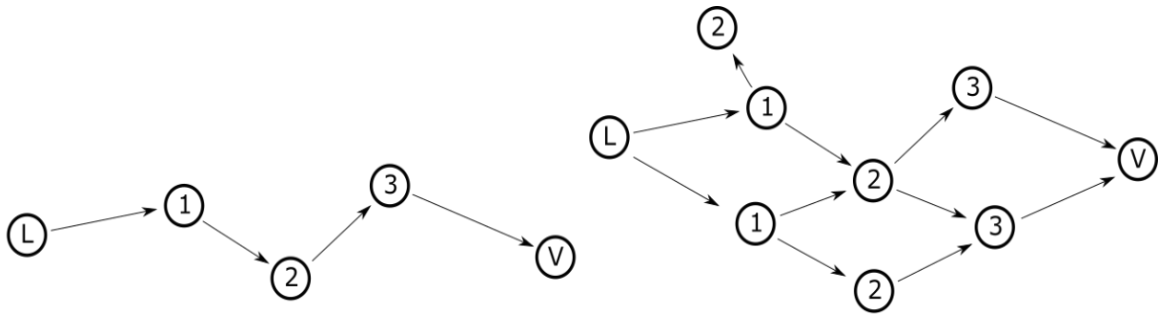
BRN-tekniologiasta käytettävästä reititysmenetelmästä johtuen, verkossa voi olla samanaikaisesti ja samalla kanavalla tapahtuvia lähetystyyppejä. Tavanomaisissa verkoissa tilanne aiheuttaisi häiriöitä luvussa 2.3 esitetyillä tavoilla, mutta BRN-verkoissa näin ei ole, koska saman viestin samanaikaiset lähetykset ovat keskenään identtisiä. Tällöin lähetykset eivät häiritse toisiaan, vaan muodostavat niin sanottuja yhteislähetystyyppejä ja solmujen välistä yhteistoimintaa.

Yhteislähetysten ansiosta yksittäinen solmu voi vastaanottaa viestin samanaikaisesti usealta lähettäjältä kuvassa 8 esitetyllä tavalla. Etuna tavanomaiseen yhteyteen on se, että yhteislähetystyypissä eri lähetysten tehot summautuvat ja yhteislähetystyypin kokonaisteho on suurempi [1, p. 5].



Kuva 8 Tavanomainen yhteys ja BRN-verkon usean solmun yhteislähetys

Ero tavanomaisen ja BRN-verkon välillä on huomattava myös useammasta solmusta koostuvissa reiteissä. Yhteistoiminnan ansiosta BRN-verkon muodostamalla reitillä voi olla useita rinnakkaisia, samanaikaisesti lähetettäviä solmuja. Vastaavasti tavanomaisella järjestelmällä verkon läpi kulkee yksittäinen reitti. Useamman solmun yli kulkevien yhteyksien muodostumista tavanomaisessa verkossa ja BRN-tekniologiaan perustuvassa verkossa on havainnollistettu kuvassa 9.



Viestin eteneminen tavanomaisessa langattomassa verkossa

Yksittäisen viestin eteneminen BRN-verkossa

Kuva 9 Tavanomaisen langattoman verkon reitti ja BRN-verkon reitti

Kuten luvussa 2.3 on mainittu, häipymä johtuu lähettäjän ja vastaanottajan välissä olevista esteistä. Solmujen yhteislähetysten myötä vastaanottaja voi vastaanottaa lähetysten useasta eri suunnasta tai useaa eri reittiä pitkin. Tämä voi vähentää häipymästä johtuvia yhteyksien katkeamisia.

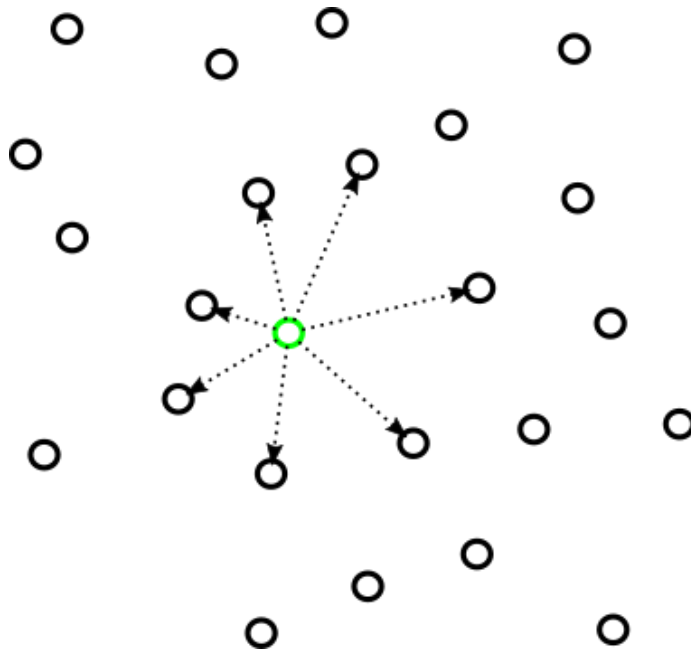
3.3 Broadcast-lähetykset

Kuten edellä on todettu *broadcast*-lähetykset ovat BRN-verkkojen tyypillisin lähetystyyppi. *Broadcast*-lähetyksellä yksittäisen solmun lähettämä viesti välitetään kaikille verkon laitteille. Kuvissa 10-13 on esitetty yksittäisen *broadcast*-lähetysten eteneminen verkossa. Kuvatussa verkossa aikajakokanavoinnin aikaviipaleet on jaettu kolmen viipaleen kehyksiin, jolloin lähettäjänä toimiva solmu saa lähettää uuden viestin joka kolmannessa aikaviipaleessa. Kuvassa 9 vihreällä pallolla kuvattu solmu toimii ensimmäisenä lähettäjänä ja mustilla nuolilla on kuvattu onnistuneita lähetystyyppejä naapurisolmuihin. Seuraavaksi kaikki ensimmäisessä aikaviipaleessa viestin onnistuneesti vastaanottaneet solmut, joita on kuvassa 11 esitetty vihreillä palloilla, lähettävät vastaanottamansa viestin eteenpäin kehyksen toisessa aikaviipaleessa. Seuraavaksi toisessa aikaviipaleessa viestin vastaanottaneet solmut, joita on kuvassa 12 esitetty vihreillä palloilla, lähettävät viestin eteenpäin kolmannessa aikaviipaleessa. Seuraavaksi kolmannessa aikaviipaleessa viestin vastaanottaneet solmut lähettävät viestin eteenpäin seuraavan aikaviipaleen ensimmäisessä aikaviipaleessa. Samaan aikaan myös alkuperäisenä lähettäjänä toiminut solmu saa lähettää verkkoon uuden viestin. [6] Tilannetta on esitetty kuvassa 13, jossa samanaikaisesti lähetäviä solmuja on kuvattu vihreällä pallolla.

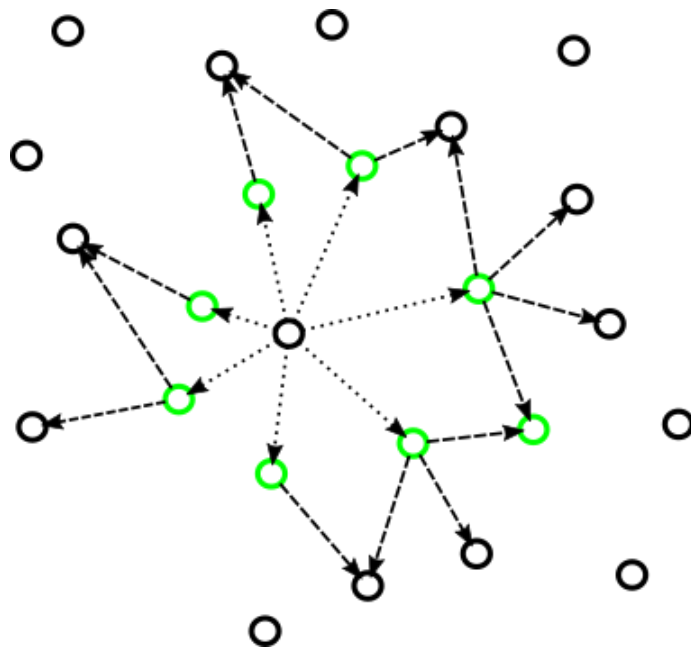
Koska samassa aikaviipaleessa lähetävien solmujen viestit ovat keskenään identtisiä, syntyy solmujen yhteislähetystyyppejä, jolloin yksittäinen verkon solmu voi vastaanottaa saman lähetysten useammalta lähettäjältä. Kuvissa tämä on havainnollistettu useana yhteen solmuun johtavana nuolena. Yhteislähetysten etuna on se, että useasta lähteestä tulevat signaalit summautuvat ja kasvattavat lähetysten tehoa vastaanottajalle. Lisäksi lähetys voi kulkea useaa eri reittiä pitkin, jolla voidaan osaltaan parantaa luotettavuutta esimerkiksi häipymästä johtuvia häiriöitä vastaan. Viestin etenemi-

nen takaisin kohti alkuperäistä lähettäjästä tai ympäri verkkoa on estetty siten, ettei solmu lähetä samaa viestiä kuin kerran. Mikäli viesti on vastaanotettu aikajakokehyksen viimeisessä aikaviipaleessa, lähettää solmu sen eteenpäin seuraavan kehyksen ensimmäisessä aikaviipaleessa, kuten kuvassa 13 vihreillä pallolla kuvatuista solmuista.

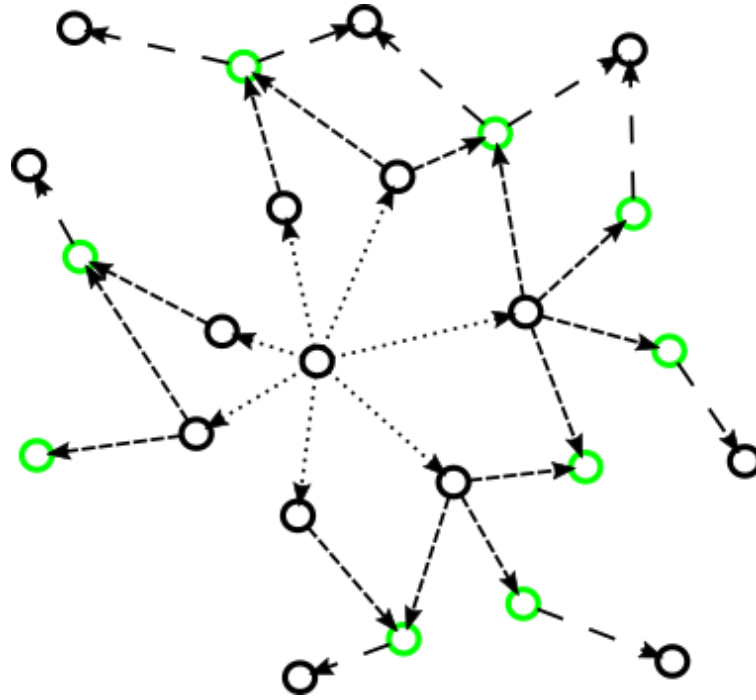
Huomioitavaa on, että tavanomaisissa MANET-verkoissa samanaikaiset lähetykset edellyttävät törmäysten hallintaa lähekkäin olevien solmujen suhteen. BRN-verkossa yksittäisen *broadcast*-lähetyksen tapauksessa vastaavaa ongelmaa ei ole, koska kaikki samanaikaisesti lähetettävät viestit ovat keskenään identtisiä, jolloin samanaikaiset lähetykset muodostavat yhteislähetyksiä [1].



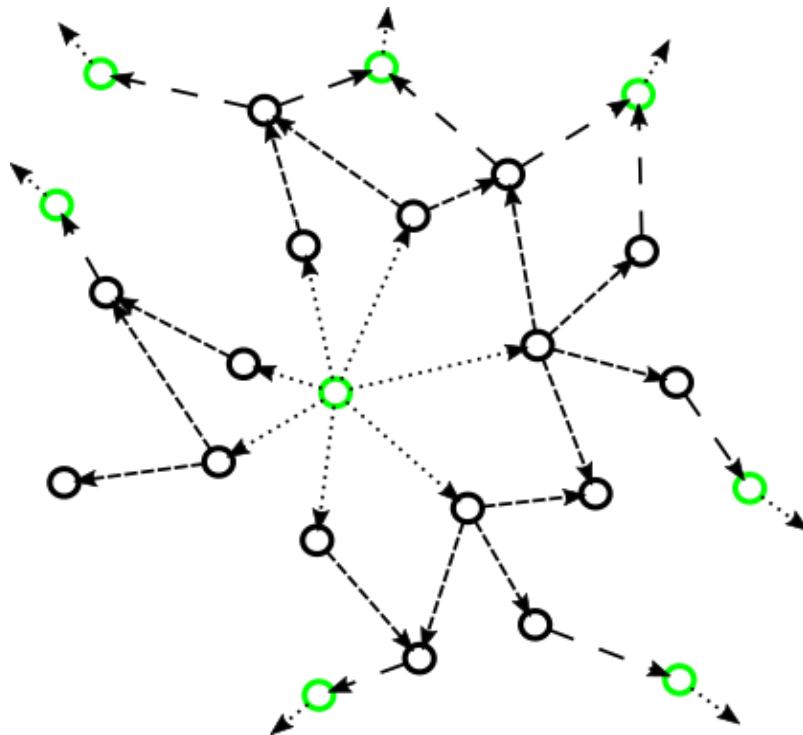
Kuva 10 Ensimmäisen aikaviipaleen lähetykset



Kuva 11 Toisen aikaviipaleen lähetykset



Kuva 12 Kolmannen aikaviipaleen lähetykset



Kuva 13 Seuraavan kehyksen ensimmäisen aikaviipaleen lähetykset

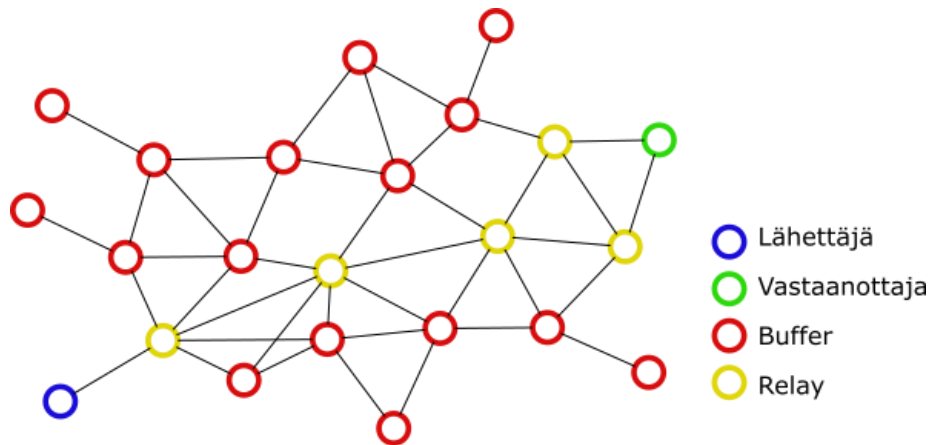
3.4 Hallitut solmuryhmät

Kuten kirjallisuudessa on mainittu, MANET-verkoissa tietoliikenne on painottunut vahvasti *broadcast*-lähetyksiin. Lisäksi *unicast*- ja *multicast*-lähetykset voitaisiin toteuttaa niin, että viesti kulkisi koko verkon läpi, mutta ainoastaan halutut vastaanottajat purkaisivat viestin tulkittavaan muotoon. Tämän menetelmän käyttö kuitenkin rasittaa koko verkkoa ja rajoittaa siten sen kapasiteettia.

Ruuhkautumista voidaan vähentää muodostamalla verkon sisälle CBR (engl. Controlled Barage Region):ta, eli hallittuja solmuryhmiä, joiden avulla niissä kulkevat viestit eivät leviä koko verkkoon ja muualla verkossa kulkevat viestit eivät leviä solmuryhmissä kulkeviin viesteihin. Käytännössä CBR on lähettäjän ja vastaanottajan välille muodostuva yhteys, jolla voi olla useampia eri reittejä. [1]

Hallittuja solmuryhmiä muodostetaan jakamalla verkon solmut *relay*- ja *buffer*-solmuiksi. *Buffer*-solmut eivät lähetä vastaanottamiaan viestejä eteenpäin. *Relay*-solmut sen sijaan toimivat normaalisti ja lähettävät vastaanottamansa viestit eteenpäin. *Relay*- ja *buffer*-solmujen määrittely tapahtuu *broadcast*-lähetyksinä lähetettävien RTS- ja CTS-viestien avulla. [1], [4]

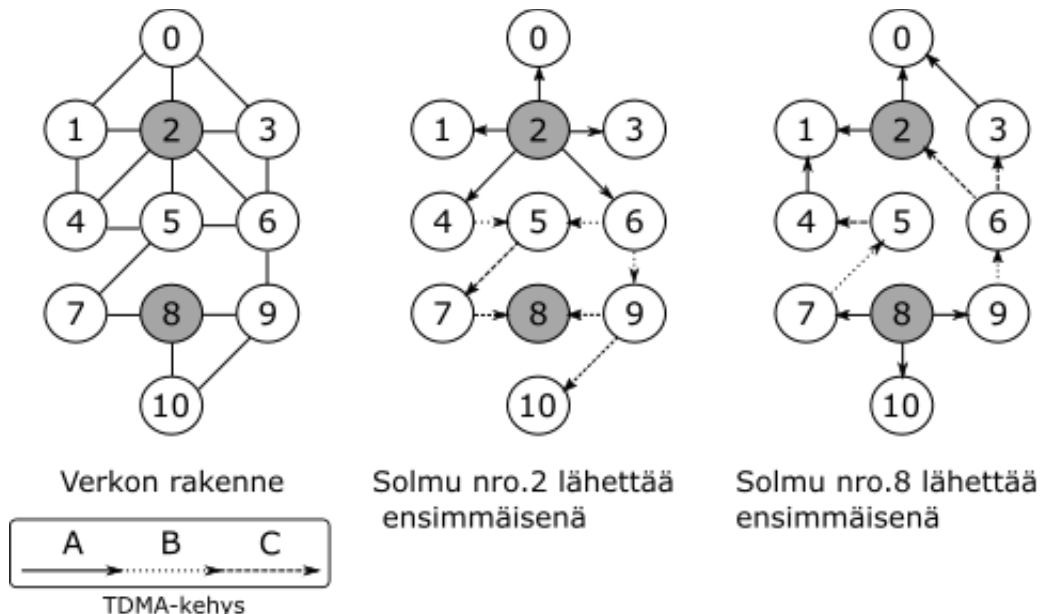
Kun lähettäjä lähettää CRTS-viestin, jokainen sitä välittävä solmu kasvattaa aikaviipalelasurikentän arvoa yhdellä. Näin vastaanottajalle selviää, mikä on lyhyin reitti lähettäjältä. Tämän jälkeen vastaanottaja lähettää CTS-viestin, joka sisältää tiedon lyhyimmästä mahdollisesta reitistä, sekä samanlaisen aikaviipalelasurikentän kuin RTS-viestissä, jonka arvoa viestiä välittävät solmut kasvattavat yhdellä. Kun CTS-viesti on välitetty alkuperäiselle RTS-viestin lähettäjälle, tietävät kaikki verkon solmut sekä lyhyimmän etäisyyden (S) lähettäjän ja vastaanottajan välillä, että itsensä kautta kulkevan reitin pituuden sen läpi kulkemiseen tarvittavien aikaviipaleiden lukumäärässä mitattuna. Kaikki solmut, jotka ovat reitillä, jonka pituus on $S+1$ tai enemmän, muutetaan *buffer*-solmuiksi, jolloin ainoaksi yhteydeksi lähettäjän ja vastaanottajan välillä jäävät reitit, joiden pituus on S . Näin muodostunutta hallinnoitua solmuryhmää on esitetty kuvassa 14. Vastaavasti CBR reitistä voidaan muodostaa leveämpi määrittelemällä *relay*-solmut myös reitiltä, jonka pituus on $S+2$. Tällöin reitillä tapahtuvien yhteislähetykset kasvavat, koska samanaikaisesti lähetäviä solmuja on todennäköisesti enemmän. [1] Solmujen yhteislähetysten ja yhteistoiminnan hyödyistä on kerrottu tarkemmin luvussa 3.2.



Kuva 14 Hallittu solmuryhmä

3.5 Usean lähteen vuoronjako

BRN-tekniikkaa yleisesti esittelevässä kirjallisuudessa, kuten [1], [2], [6] on esitelty usein vain tilanteita, joissa verkossa tai sen hallinnoituissa solmuryhmissä etenee ainoastaan yksi viesti samanaikaisesti. Konferenssijulkaisussa [10] on kuitenkin käsitelty BRN-verkon toimintaa useamman samanaikaisen *broadcast*-lähetyksen kanssa. Kuten julkaisussa on todettu, yksinkertaisin toteutus usean lähteen tukemiselle olisi lähetyksen vuorottelu siten, että verkossa etenee vain yksi lähetykset kerrallaan. Tätä yksinkertaista menetelmää on havainnollistettu kuvassa 15.



Kuva 15 Kahden lähteen broadcast lähetykset BRN-verkossa

Harmaalla pallolla kuvattu solmu nro.2 lähettää ensin *broadcast*-lähetyksen, joka saavuttaa kaikki verkon solmut kolmen aikaviipaleen aikana. Vasta tämän jälkeen solmu nro.8 lähettää oman

broadcast-lähetyksenä. Pahimmassa tapauksessa solmu nro.8 voi siis joutua odottamaan omaa lähetyksensä kolmen aikaviipaleen verran. Tästä johtuen jälkimmäisen lähetyksen viive voi olla huomattava. Lisäksi vastaavasta tilanteesta aiheutuva viive kasvaa entisestään, mikäli verkko on solmumäärältään suurempi tai rakenteeltaan sellainen, että viestin kulkeutuminen sen läpi vaatii useamman aikaviipaleen.

Julkaisussa [13] on käsitelty yhtä tehokkaampaa vuoronhallinta-algoritmia usealla samanaikaisella *broadcast*-lähetyksellä. Menetelmän avulla on saatu huomattavia parannuksia muun muassa viiveen ja verkon läpäisykyvyn osalta yksinkertaiseen vuoronhallintaan verrattuna. Tästä huolimatta ero yksittäisen lähettäjän tilanteeseen on suuri ja menetelmän käyttäminen edellyttää huomattavasti monimutkaisempaa reititys- ja vuoronhallintamenettelyä, joka lisää muun muassa verkon hallintaan tarvittavan tiedonsiirron määrää verkossa.

Kuten edellä on todettu, usean samanaikaisen lähetyksen tilanteet vaikeuttavat teknologialle asetettujen vaatimusten täyttämistä etenkin latenssin suhteen. Samanaikaisten lähetysten määrä vaikuttaa myös verkon läpäisykykyyn merkittävästi. Myös verkon koolla ja rakenteella on suuri merkitys, sillä vuoronhallinnan merkitys kasvaa käyttäjien lukumäärän kasvaessa. Huomioitavaa on myös se, ettei kaksi eri lähetystä voi muodostaa usean solmun lähetyksestä muodostuvaa yhteislähetystä, vaan törmäävät lähetykset vaikuttavat toisiinsa häiriönä summautumisen sijaan. [13]

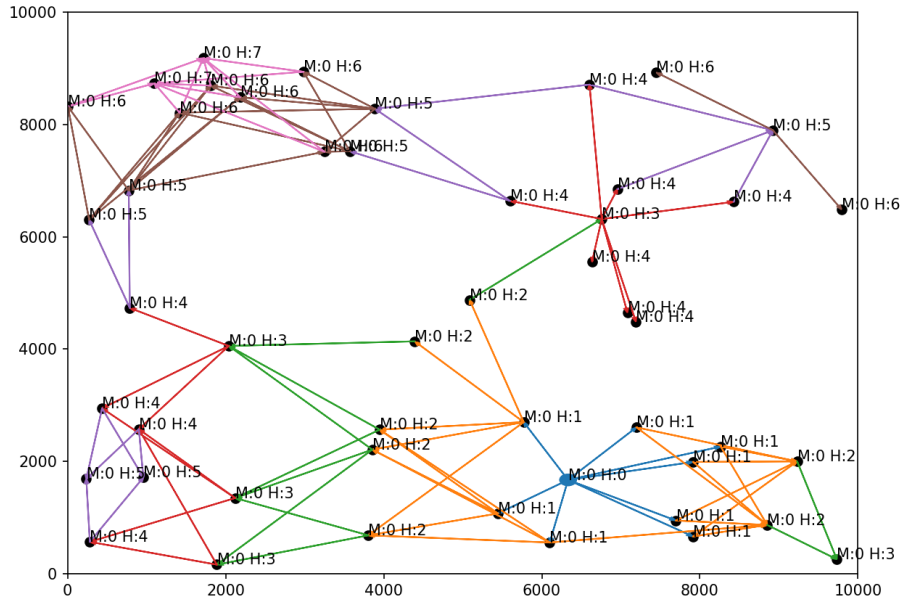
4. SIMULAATIOTULOKSET

Työtä varten toteutettiin simulaattori, jolla pyritään tutkimaan ja visualisoimaan viestin etenemistä BRN-verkossa. Simulaattoriin voidaan määrittää solmujen määrä, simuloitavan alueen koko, solmuina toimivien laitteiden lähetysteho ja vastaanottimen herkkyys, sekä solmujen välinen minimietäisyys. Simulaattori asettelee halutun määrän solmuja satunnaisesti alueelle, mikäli se on mahdollista. Tarvittaessa lähetävien solmujen sijainti voidaan määrittää manuaalisesti.

Reitityksessä simulaattori noudattaa kirjallisuudessa kuvattua menetelmää [6], jolloin solmu lähettää onnistuneesti vastaanottamansa viestin seuraavassa aikaviipaleessa. Luvussa 2.3 esitettyjen langattoman verkon törmäystyyppien mukaan simulaattorissa on oletettu, ettei solmu voi lähettää ja vastaanottaa viestiä samanaikaisesti. Lisäksi usean samanaikaisen lähettäjän tilanteessa, jossa solmu vastaanottaa useampaa eri viestiä samanaikaisesti, onnistuu vastaanotto ainoastaan, mikäli yksittäisen viestin vastaanottoteho on vähintään asetettavan raja-arvon verran suurempi kuin muiden viestien lähetysten vastaanottotehojen summa. Simulaattorissa on otettu huomioon solmujen yhteistoiminnan, eli identtisten lähetysten tehot summataan yhteen, kuten luvussa 3.2 on kuvattu. Jokaisen lähetysten vastaanottoteho lasketaan vapaan tilan vaimenemista noudattaen. Lämpökohtinasta ja muista epäideaalisuuksista aiheutuvia häiriöitä ei ole otettu huomioon.

4.1 Reitityksen mallintaminen

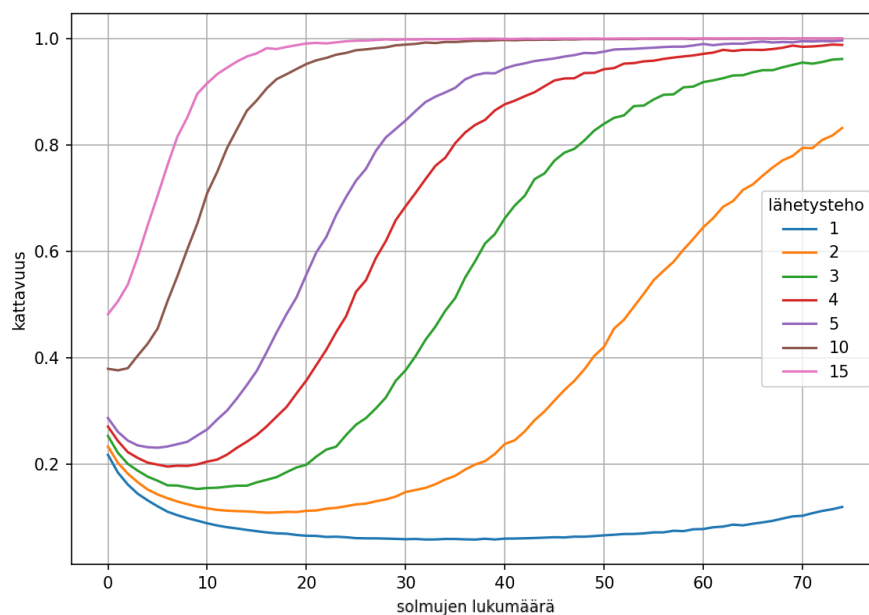
Reitityksen mallintamisen tavoitteena on helpottaa reitityksen hahmottamista visuaalisesti, sekä mahdollistaa simulaattorin toiminta muita simulointeja varten. Kuvassa 16 on havainnollistettu yksittäisen *broadcast*-lähetysten etenemistä BRN-verkossa. Yksittäisen solmun vastaanottaman viestin tunnusnumero (M), sekä sen etäisyys alkuperäisestä lähteestä (H) näkyvät solmuja kuvaavien pisteiden päällä. Lisäksi yhteyttä kuvaavien viivojen väri muuttuu aikaviipaleen järjestysnumeron H mukaan, jolloin samanaikaisten lähetysten väri on sama. Lisäksi alkuperäistä lähettäjä on kuvattu sinisellä pallolla. Kuten kuvasta 16 huomataan, simulaattori noudattaa aiemmin mainittuja reitityssääntöjä ja solmujen yhteistoiminta on huomattavissa useana yksittäiseen solmuun johtavana viivana.



Kuva 16 Simuloitu yksittäisen viestin eteneminen verkossa

4.2 Solmujen tiheyden vaikutus lähetyksen kattavuuteen

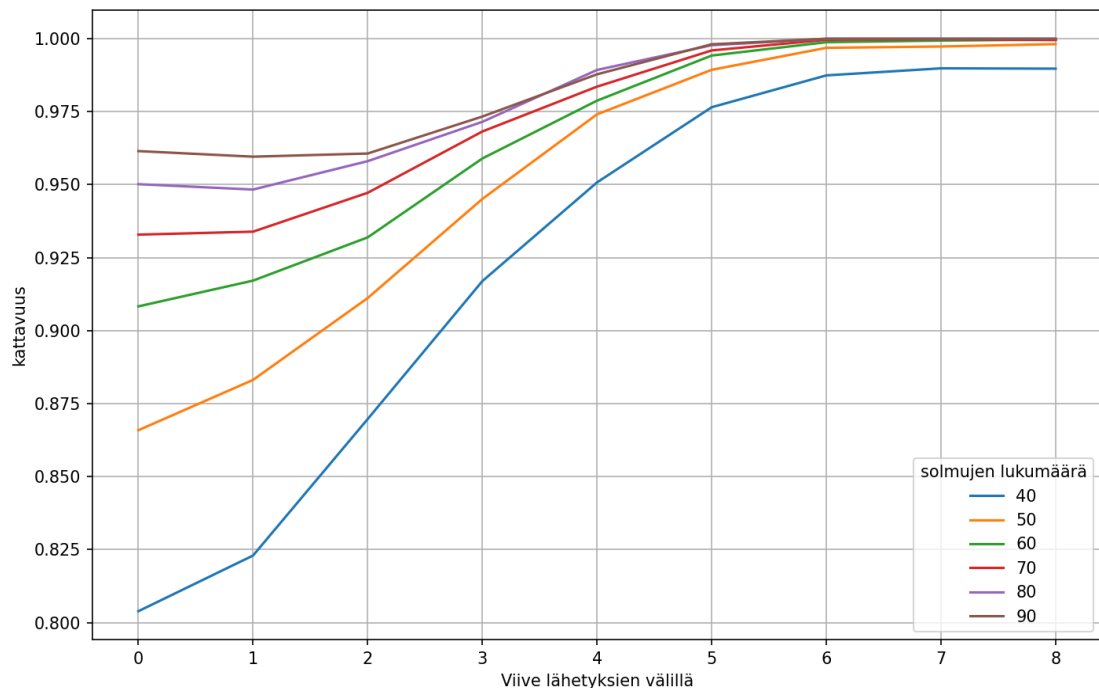
Solmujen tiheyden vaikutusta *broadcast*-lähetyksen kattavuuteen simuloitiin käyttämällä $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ aluetta, kaikkien solmujen lähetysteho oli 10 W ja vastaanottimien herkkyys -50 dBm . Vaimeenemismallina käytettiin tavallista avoimen tilan mallia. Kaikkein solmujen sijainnit arvottiin satunnaisesti. Kuten kuvasta 17 huomataan, saavutettiin lähes täydellinen kattavuus 10 W teholla noin 30 solmulla. Kattavuus kasvaa odotetusti lähes lineaarisesti, mutta hidastuu hieman ennen täydellisen kattavuuden saavuttamista. Tulos on oleellinen seuraavia simuloiteja varten, mutta siitä huomataan myös solmutiheyden vaikutus BRN-verkon luotettavuudelle.



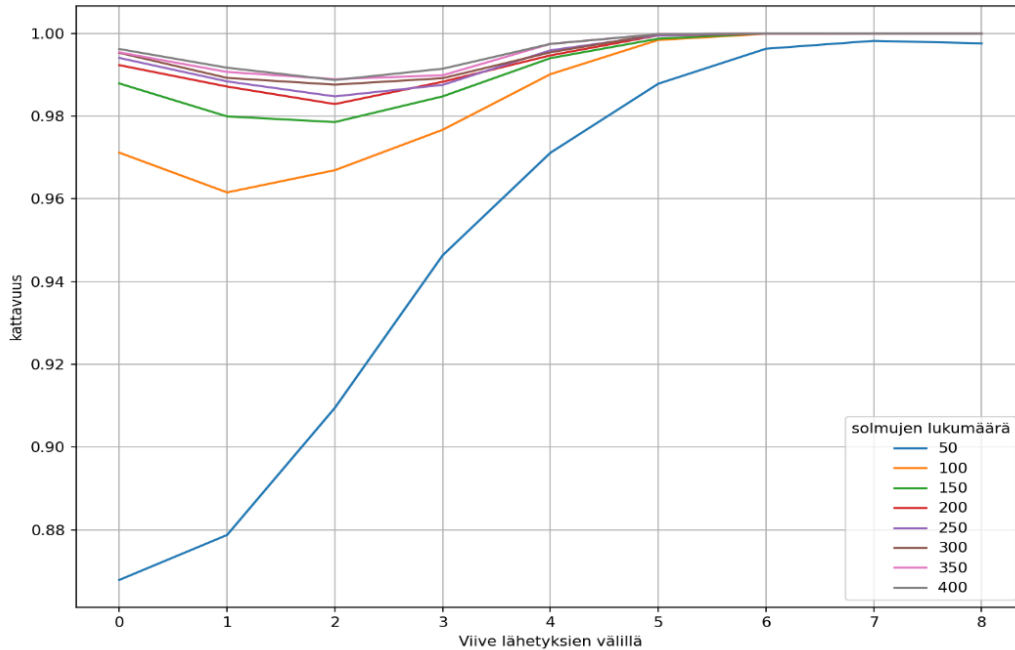
Kuva 17 Solmutiheyden ja lähetystehon (W) vaikutus lähetyksen kattavuuteen

4.3 Usean lähettäjän tilanne ilman vuoronhallintaa

BRN-verkkoja koskevista julkaisuista on käsitelty varsin vähän tilanteita, joissa verkossa on useampi lähettäjä. Luvussa 3.5 on esitelty joitakin mahdollisia ratkaisuja vuoronhallinnan haasteisiin. Simuloinneissa kävi ilmi, että pienellä solmutiheydellä verkon kyky välittää *broadcast*-lähetystyksiä heikkeni selvästi, kuten kirjallisuudessakin [14] on mainittu. Kasvattamalla solmutiheyttä lähetettyjen *broadcast*-viestien suhteellinen kattavuus myös nousi. Kuten edellä todettiin, yksittäisellä *broadcast*-lähetyksellä saavutetaan kuvatuilla ominaisuuksilla lähes täydellinen kattavuus noin 40 solmulla. Vastaavasti kahdella lähetyksellä ja vaihtuvalla aikaerolla lähetysten välillä huomataan, että kattavuus saavuttaa yksittäisen lähetysten tason noin 5–6 aikaviipaleen viiveellä lähetysten välillä, kuten kuvista 18 ja 19 nähdään. Vastaavasti suhteellinen kattavuus paranee nopeasti solmujen lukumäärää kasvattamalla. Suurestakaan solmujen lukumäärästä huolimatta kahdella samanaikaisella lähetyksellä ei saavuteta täydellistä kattavuutta.

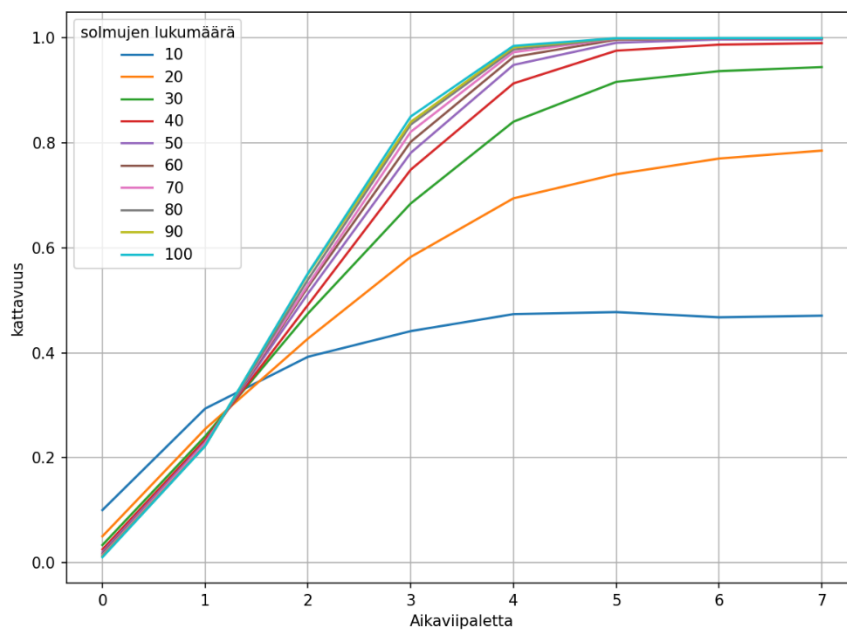


Kuva 18 Kahden lähetysten kattavuus 40–90 solmulla



Kuva 19 Kahden lähetyksen kattavuus 50–350 solmulla

Kuvassa 19 huomioitavaa on notkahdus kattavuudessa 2–3 aikaviipaleen viiveen kohdalla. Tarkkaa syytä notkahdukselle ei simuloinneissa keksitty, mutta notkahdus tapahtuu varsin tarkasti viiveellä, joka on puolet täydelliseen kattavuuteen tarvittavasta aikaviipaleiden lukumäärästä. Lähetysten kattavuutta käytettyjen aikaviipaleiden funktiona on esitelty kuvassa 20. Kuten kuvasta huomataan, täydellinen kattavuus yksittäisellä broadcast-lähetyksellä, 50 solmulla ja luvussa 4.2 mainituilla asetuksilla saavutetaan 5. aikaviipaleella. Huomioitavaa on myös se, ettei solmutiheydellä ole juuri merkitystä viestin etenemisnopeuteen simuloituissa olosuhteissa.



Kuva 20 Yksittäisen lähetyksen kattavuus aikaviipaleiden funktiona

Luvussa 3.5 mainitaan yksinkertainen usean lähteen vuoronjako, jossa lähetykset lähetettäisiin verkkoon yksitellen siten, ettei verkossa olisi samanaikaisesti kuin yksi lähetyks. Simulointien perusteella menetelmä olisi perusteltu ainakin pienillä solmutiheyksillä sillä lähetyksien samanaikaisuus heikentää niiden kattavuutta merkittävästi, kuten kuvassa 18 huomataan. Pienen solmutiheyden tarkka määritelmä riippuu muun muassa solmujen lähetystehoista, herkkydestä, verkon rakenteesta ja muista ominaisuuksista. Tiheissä verkoissa lähetysten välisen viiveen kasvattaminen ei aina paranna kattavuutta, vaan täsmälleen samanaikaisten lähetysten tilannetta parempi kattavuus saavutetaan vasta lähes samalla aikaviipaleiden määrällä, kun mitä täydelliseen kattavuuteen tarvitaan yksittäisen lähetyksen tilanteessa. Lisäksi simuloituissa tilanteissa suurilla solmumäärillä saavutettu kattavuus on niin hyvä, ettei tarvetta erilliselle vuoronhallinnalle välttämättä ole.

5. YHTEENVETO

BRN-teknologia keskeisenä kehitystavoitteena on erittäin hyvä luotettavuus, sekä lyhyet latenssit myös haastavissa olosuhteissa. Monien muiden MANET-toteutuksien tapaan tämä on tarkoittanut tinkimistä muista verkon ominaisuuksista. BRN-verkkojen tapauksessa näitä ominaisuuksia ovat muun muassa toiminta usean lähetyksen tilanteissa [13] tai *unicast- ja multicast*-lähetyksien tehokkuus. Toisaalta aiemmin mainittujen, tärkeimpien ominaisuuksien osalta BRN-verkkojen ominaisuudet täyttävät sille asetetut vaatimukset. Lisäksi BRN-verkon kapasiteetti skaalautuu erittäin hyvin *broadcast*-lähetyksillä, joiden on todettu olevan yleisin ja tärkein verkossa kulkeva lähetysmuoto.

Usean lähetyksen reitityksen osalta tarkempia johtopäätöksiä on hankala vetää, sillä aihetta on tutkittu hyvin vähän. Luvussa 3.5 on kerrottu yksinkertaisesta usean lähteen vuoronjaosta, joka käytännössä estää usean samanaikaisen lähetyksen välittämisen verkossa. Julkaisussa [13] kuvattulla älykkäällä usean lähteen vuoronjaolla saadaan parannettua verkon ominaisuuksia, mutta samalla kasvatetaan verkon hallintaan tarvittavan tiedon määrää sekä monimutkaistetaan reititystä selvästi. Ongelmaa hankaloittaa ennestään BRN-verkkojen dynaamisuus ja mahdollisesti myös niiden koko. Pienissä verkoissa yksinkertaisella reitityksellä päästään todennäköisesti riittävän hyvään suorituskykyyn, mutta tilanne saattaa muuttua verkon koon kasvaessa. Lisäksi verkon koon arvioiminen sen kattamiseen tarvittavien aikaviipaleiden perusteella voisi olla kuvaavampaa käyttäjien lukumäärän sijasta. Tämä siksi, että suurenkin käyttäjämäärän kattaminen aukealla alueella voi onnistua pienellä määrällä aikaviipaleita, mutta esimerkiksi tunnelissa tai kerrostalossa olevien käyttäjien saavuttaminen voi edellyttää huomattavasti suurempaa määrää aikaviipaleita.

Kokonaisuudessaan BRN-teknologia toimii hyvin sovellutuksissa, joihin sen suunnittelu ja erottuukin selvästi muista MANET-toteutuksista luotettavuuden ja pienilatenssisten *broadcast*-lähetyksien osalta. Myös muiden lähetystyyppien osalta BRN-verkot suoriutuvat riittävän hyvin, vaikka niiden toiminnallisuudet sisältävätkin omat haasteensa. BRN-verkkojen suorituskykyä tulisikin monien muiden MANET-verkkojen tapaan arvioida hyvin tarkasti käyttötapojen ja olosuhteiden mukaisesti.

6. LÄHDELUETTELO

- [1] A. Blair, T. Brown, K. M. Chugg, T. R. Halford ja M. Johnson, *Barrage Relay Networks for cooperative transport in tactical MANETS*, San Diego; Los Angeles: TrellisWare Technologies, Inc.; University of Southern California, 2008.
- [2] T. R. Halford ja K. M. Chugg, *Barrage Relay Networks*, Los Angeles, 2010.
- [3] T. A. Courtade, K. A. Turck ja T. R. Halford, *The User Capacity of Barrage Relay Networks*, 2012.
- [4] Q. Na, W. Xueping ja L. Yantao, *Simulation Studies on Barrage Relay Networks*, 2019.
- [5] S. Vasudevan, V. Subashri ja D. Kothari, *Computer Networking*, New Delhi: Alpha Science International, 2015.
- [6] A. Blair, T. Brown, K. Chugg ja M. Johnson, "Tactical mobile mesh network system design," San Diego, 2007.
- [7] A. Tanenbaum ja D. Wetherall, *Computer networks*, Pearson Education, 2013.
- [8] R. Hekmat, *Ad-hoc Networks: Fundamental Properties and Network Topologies*. 1st ed, Dordrech: Springer Netherlands, 2006.
- [9] A. Goldsmith, *Wireless Communications.*, Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [10] J. Loo, J. L. Mauri ja J. H. Ortiz, *Mobile ad hoc networks : current status and future trends. 1st edition*, Boca Raton Florida: CRC Press, 2012.
- [11] H. Gregory ja T. R. Halford, *Barrage Relay Networks for unmanned ground systems*, San Diego, 2010.
- [12] P. Andreas, K. M. Chugg ja T. R. Halford, *Barrage Relay Networks: System & Protocol Design*, 2010.
- [13] J. Yan, W. L. Chen Tian, L. Tu ja B. Huang, *Multi-source Broadcast Scheduling Algorithm of Barrage Relay Network in Tactical MANET*, Huazhong: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [14] W. Nicholas, J. Mingyue ja B. Kraczek, *Predicting Needs in Future Decentralized Networks through Analysis of Barrage Relay Networks*, 2021.