

Jarmo Järvi

# **Bluetooth pohjaiset PAN-verkot ja niiden ongelmia**

Tietojärjestelmätieteen  
Kandidaatintutkielma  
11.5.2003

Jyväskylän yliopisto  
Tietojenkäsittelytieteiden laitos  
Jyväskylä

## TIIVISTELMÄ

Järvi, Jarmo Olavi

Bluetooth pohjaiset PAN-verkot ja niiden ongelmia / Jarmo Järvi

Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, 2003.

25 s.

Tietojärjestelmätieteen kandidaatintutkielma

Tämä tutkielma on katsaus siihen, mitä Bluetooth pohjaiset PAN-verkot (Personal Area Network) oikeastaan ovat. Lisäksi tutustutaan muutamaan niihin läheisesti liittyvään ongelmaan.

AVAINSANAT: Bluetooth, PAN, personal area network

## SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO .....	4
2 BLUETOOTH .....	6
2.1 Bluetooth SIG .....	6
2.2 Teknologia .....	6
2.3 Protokollapino.....	7
2.4 Bluetooth profiilit.....	9
3 BLUETOOTH POHJAISET PAN-VERKOT .....	10
3.1 Pikoverkko.....	10
3.2 Hajaverkko .....	10
3.3 PAN Profiili .....	11
4 ONGELMIA JA MAHDOLLISIA RATKAISUJA .....	13
4.1 Reititys hajaverkoissa .....	13
4.2 IP reititys Bluetooth PANissa.....	13
4.3 Verkon topologian tehokkuus .....	14
4.4 Pikoverkkojen välinen aikataulutus.....	17
4.5 Bluetooth laitteiden aiheuttama keskinäinen häiriö .....	19
4.6 Bluetoothin ja IEEE 802.11b:n (WiFi) häiriö.....	20
4.7 Turvallisuus.....	21
5 YHTEENVETO.....	22
LÄHDELUETTELO .....	23

# 1 JOHDANTO

Viime aikoina langaton tiedonsiirto on noussut entistä tärkeämpään asemaan. Enää ei riitä, että matkapuhelimet pystyvät langattomaan tiedonsiirtoon, mutta myös muiden mobiililaitteiden odotetaan pystyvään samaan. Lähellä toisiaan olevien laitteiden pitää pystyä helposti tiedonsiirtoon keskenään. Tätä tarvetta ratkaisemaan on kehitetty Bluetooth teknologia.

Eräs Bluetoothin sovelluskohde ovat PAN-verkot (Personal Area Network) eli henkilökohtaiset lähiverkot. PAN-verkot ovat ad hoc -verkkoja, joka tarkoittaa langattomien laitteiden muodostamaa verkkoa, jolla ei ole kiinteää arkkitehtuuria. Eli laitteet itsessään muodostavat verkon. Ad hoc -verkoista puhuttaessa joskus käytetään myös termiä MANET (mobile ad hoc network), mutta tässä tutkielmassa käytetään termiä ad hoc -verkko. Bluetooth PAN-verkkojen odotetaan ratkaisevan kolme käyttötarvetta (Jordan R. 2002):

- 1) Johtojen korvaaja. Esimerkiksi PC:n ja sen lisälaitteiden johtojen korvaaminen Bluetooth yhteyksillä
- 2) Pienten ad hoc -verkkojen mahdollistaminen. Esimerkiksi konferenssissa osallistujien päätelaitteet (kämmentietokone, kannettavat yms.) voivat automaattisesti muodostaa verkon ja olla yhteydessä toisiinsa
- 3) Yhteyden tarjoaminen johonkin laajempaan verkkoon. Esimerkiksi, jos edellisen esimerkin konferenssiin lisätään jonnekin yksi Bluetooth-LAN silta, joka on yhteydessä Internetiin, voivat kaikki tuon Bluetooth verkon jäsenet päästä myös Internetiin

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on luoda katsaus siihen, mitä ovat Bluetooth pohjaiset PAN-verkot. Tarkoituksena olisi, että lukijalle jäisi yleinen kuva siitä, mitä nämä verkot ovat ja miten ne toimivat.

Luvussa 2 käsitellään ensin yleisesti Bluetooth teknologiaa. Tässä tutkielmassa tosin pystytään suhteellisen yleisellä tasolla, eikä mennä teknisiin yksityiskohtiin.

Luvussa 3 käsitellään Bluetooth PAN-verkkojen rakennetta. Selvitetään sellaisia käsitteitä kuin piko- ja hajaverkko. Lisäksi myös käsitellään Bluetooth SIG:n julkaisemaa PAN profiilia.

Lukuun 4 on kasattu joitain Bluetooth PAN:eihin liittyviä ongelmia. Ongelmat on valittu niin, että ne liittyvät läheisesti Bluetooth PAN-verkkoihin, eivätkä yleisesti ad hoc -verkkoihin tai vain Bluetoothiin.

Lopuksi luvussa 5 kerätään yhteen tutkimuksen tärkeimmät tulokset.

## 2 BLUETOOTH

Tässä kappaleessa käsitellään Bluetooth teknologiaa yleisellä tasolla, menemättä teknisiin yksityiskohtiin. Bluetoothia käsitellään niiltä osin kuin sitä tarvitaan PAN-verkkojen ymmärtämisessä ja kappaleessa 4 esitettävien ongelmien tarkastelussa.

### 2.1 Bluetooth SIG

Bluetooth SIG (Special Interest Group) on järjestö, joka on vastuussa Bluetooth teknologian kehittämisestä. Bluetooth SIG:n jäseniä ovat mm. 3Com, Ericsson, Intel, Microsoft, Nokia ja Toshiba. Mukana kuitenkin on yhteensä satoja yrityksiä.

### 2.2 Teknologia

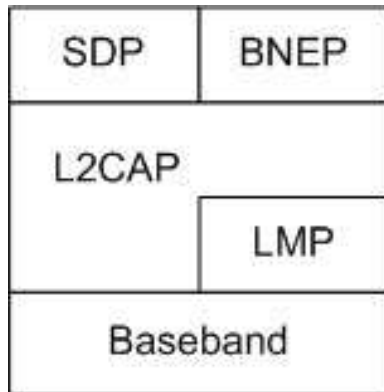
Bluetooth teknologia koostuu yhdelle piirille integroidusta radiolähtimestä sekä siihen liittyvästä protokollapinosta. Bluetooth SIG on ilmoittanut yhden piirin tavoitehinnaksi 5\$ ja tavoitekooksi 9mm\*9mm. Normaalien Bluetooth laitteiden kantama on noin 10m. Suuremmilla lähetystehoilla voidaan päästä myös jopa 100m kantomatkoihin. Bluetoothin nimellinen tiedonsiirto nopeus on 1Mb/s, josta varsinaiselle tiedonsiirrolle jää 721kb/s (Jordan R. 2002).

Bluetooth käyttää vapaata 2.4 GHz ISM-taajuutta (Industry, Scientific and Medical) (Bluetooth, core specifications). Taajuus on vapaasti kaikkien käytössä ja protokolla huolehtii siitä, etteivät esimerkiksi mikroaaltouunit ja langattomat puhelimet häiritse liikaa tiedonsiirtoa.

Bluetoothin tiedonsiirto perustuu *taajuushyppelylle* (frequency hopping). Tämä tarkoittaa sitä, että lähetystaajuutta vaihdetaan useita kertoja sekunnissa. Bluetooth vaihtaa taajuutta 1600 kertaa sekunnissa. Bluetoothissa tiedon lähettäminen perustuu *aikaväleihin* (slot), jossa laite lähettää paketin yhdellä

taajudella ja hyppää sen jälkeen seuraavalle taajudelle jonkin ennaltamääritetyn sekvenssin mukaan. Yhden aikavälin pituus on 0.625ms ja yksi lähetettävä paketti voi viedä 1, 3 tai 5 aikaväliä. (Bluetooth, core specifications)

### 2.3 Protokollapino



Kuvassa 1 näkyy Bluetoothin protokollapino, niiltä osin kuin sitä tässä tutkielmassa tarvitaan (Bluetooth, PAN). Kuvan alimpana kerroksena voisi olla vielä Bluetooth radio, mutta koska se ei varsinaisesti ole protokolla, on se jätetty kuvasta pois.

#### Baseband

**Kuva 1.** Bluetooth protokollapino niiltä osin kuin sitä tässä tutkimuksessa tarvitaan

Basebandin tehtävänä on datan ja puheen paketointi ja koodaus. Baseband myös hoitaa normaalin kryptaamisen ja purkamisen. Lisäksi tämän kerroksen tehtävänä on virheiden havaitseminen ja korjaaminen.

Baseband tarjoaa kahdenlaisia yhteys mahdollisuuksia (Bluetooth, core specifications):

- SCO (Synchronous Connection-Oriented)
- ACL (Asynchronous Connection-Less)

SCO yhteys on tarkoitettu reaaliaikaisen puheen siirtoon rajatulla tiedonsiirtonopeudella, eli se on tarkoitettu esim. Bluetooth handsfree laitteen käyttöä varten. ACL puolestaan on data yhteys, jonka tiedonsiirto nopeus on niin suuri kuin mahdollista.

## **LMP**

*LMP* (Link Manager Protocol) on vastuussa yhteyksien muodostamisesta, turvallisuudesta ja hallinnasta. LMP viesteillä on korkeampi prioriteetti kuin normaalilla datalla Bluetooth yhteyksissä. Eli jos baseband saa lähetettäväkseen LMP viestin, menee tuo viesti kaikkien normaalien dataviestien edelle. Tällä varmistetaan, että verkon ja yhteyksien hallinta onnistuu, vaikka verkossa muuten olisikin paljon liikennettä. (Bluetooth, core specifications)

## **L2CAP**

*L2CAP* (Logical Link Control and Adaptation Layer Protocol) tarjoaa korkeamman tason protokollille yhteyksellisiä ja yhteyksittömiä tiedonsiirtopalveluja. L2CAP hoitaa siis varsinaisen tiedonsiirron eri ohjelmien välillä jakamalla lähetykset paketeiksi ja taas kasaamalla ne kokonaiseksi lähetykseksi. Tällä hetkellä L2CAP tukee vain ACL yhteyksiä. (Bluetooth, core specifications)

## **SDP**

*SDP* (Service Discovery Protocol) on protokolla, jonka avulla Bluetooth laitteet voivat kysyä toisiltaan, mitä palveluja nämä tarjoavat. Bluetooth laitteessa voi toimia SDP serveri, jolla on *palvelulista* (service record) palveluista, joita se tarjoaa. Toinen Bluetooth laite voi pyytää tätä listaa, jolloin SDP serveri palauttaa tuon listan pyytävälle laitteelle. Listassa ovat kaikki palvelut, joita kyseinen laite tarjoaa. (Bluetooth, core specifications)

SDP tarjoaa vain mahdollisuuden palvelujen tunnistamiseen. Se ei ota kantaa siihen miten palveluja käytetään. Palvelun tunnistimissa on parametrina yhteystyyppi ja mahdollisesti yhteystyyppiin liittyviä parametreja. Eli jos palvelun yhteystyyppi on TCP tai UDP, niin parametrina on myös portti, josta palvelu löytyy.



Palvelutyypeillä on tunnuksset, jotka käyvät ilmi Bluetooth SIG:n julkaisemasta listasta. Listassa näkyvät tällä hetkellä varatut tunnuksset. Tunnuksia on varattu mm. hands freeille, tulostimille, langattomille puhelimille, Faxeille, Wapille yms. Lisäksi PAN-verkkoja varten on varattu myös kolme tunnusta. Tunnukslistassa on myös yleensä määritelty jokin profiili, jossa selitetään tarkemmin mitä palvelu tekee ja miten sitä käytetään.

## **2.4 Bluetooth profiilit**

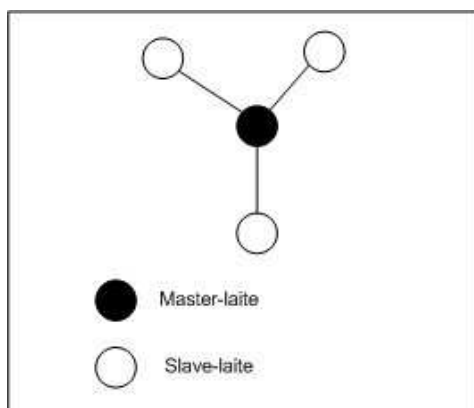
Bluetooth profiili on Bluetooth SIG:n määrittelemä standardi jollekin laitteelle tai palvelulle. Profiili määrittelee miten palvelua käytetään ja mitä palvelun on tehtävä. Palvelun sisäinen toteutus jätetään avoimeksi. Tähän mennessä julkaistut profiilit ovat vapaasti saatavilla Bluetooth SIG:n sivuilla.

Profiilin tarkoituksena on varmistaa, että jonkin valmistajan tarjoamaa palvelua pystyy käyttämään myös jonkun muun valmistajan tekemä laite. Bluetooth SIG on esimerkiksi julkaissut hands free profiilin. Nyt kun hands free laite tarjoaa tuota palvelua ja kännykkä osaa käyttää profiilissa määriteltyä palvelua, voivat kännykkä ja hands free olla eri valmistajien ja hands freeen käyttö onnistuu silti vaivattomasti.

### 3 BLUETOOTH POHJAISET PAN-VERKOT

Tässä osiossa keskitytään ensin Bluetooth pohjaisten PAN-verkkojen rakenteeseen ja sen jälkeen käsitellään vielä Bluetooth SIG:n julkaisemaa Bluetooth PAN profiilia.

#### 3.1 Pikoverkko



Kuva 1. Pikoverkko, jossa on yksi master-laite ja kolme slave-laitetta

Kun vähintään kaksi Bluetooth PAN-laitetta kohtaavat, ne muodostavat *pikoverkon* (piconet). Pikoverkossa voi olla enintään kahdeksan laitetta, joista yksi on master-laite ja loput ovat slave-laitteita. Mikä tahansa bluetooth laite voi toimia Master-laitteena.

Pikoverkossa slave-laitteet eivät voi keskustella keskenään, vaan kaikki slave-laitteet keskustelevat vain master-laitteen kanssa. Master-laite pollaa jokaista laitetta

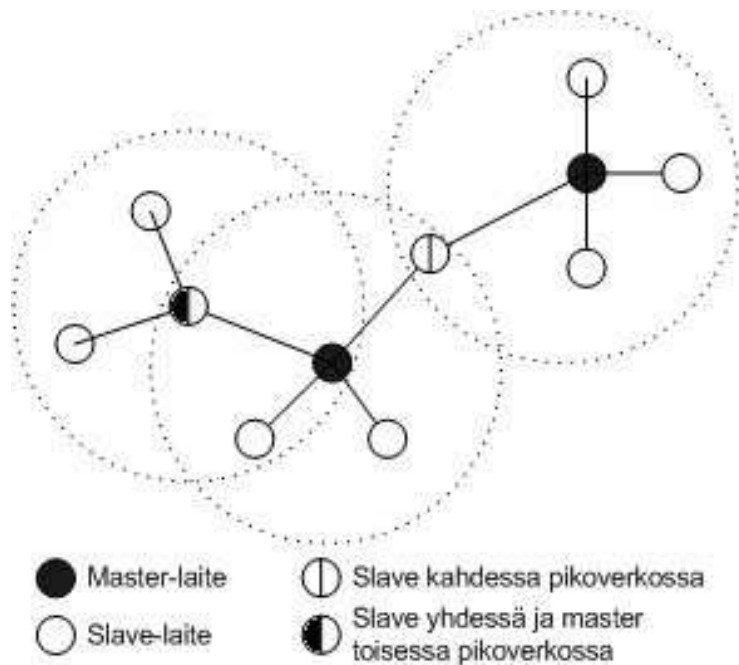
vuorollaan ja kysyy onko niillä jotain lähetettävää. Näin ollen, jos slave-laite haluaa keskustella toisen slave-laitteen kanssa, on tämänkin kommunikaation tapahduttava master-laitteen kautta.

Yksi pikoverkon laitteista voi tarjota liittymän esimerkiksi johonkin laajempaan verkkoon kuten Internetiin vaikkapa LAN-reitittimen kautta. Nyt muut pikoverkossa olevat laitteet voivat hyödyntää tätä yhden laitteen tarjoamaa mahdollisuutta.

#### 3.2 Hajaverkko

Kun kaksi tai useampia pikoverkkoja liittyy yhteen syntyy *hajaverkko* (scatternet). Tällöin joku laite toimii siltana kahden pikoverkon välissä. Yksi

laite voi toimia slave-laitteena useassa pikoverkossa, mutta master-laitteena vain yhdessä pikoverkossa. Nyt yhdessä PAN-verkossa voi olla enemmän kuin kahdeksan laitetta, tämä laajentaa PAN-verkkojen mahdollisuuksia huomattavasti.



Kuva 2 Hajaverkko, jossa kolme erillistä pikoverkkoa.

### 3.3 PAN Profiili

Bluetooth SIG on julkaissut PAN profiilin, joka tällä hetkellä versiossa 1.0 (Bluetooth, PAN). Tulevaisuudessa profiilin tarkoituksena on mahdollistaa täysin normaali IP liikenne BNEP protokollan avulla ad hoc pohjaisessa Bluetooth PAN-verkossa. Tällä hetkellä Profiili ottaa kuitenkin kantaa vasta seuraaviin asioihin (Bluetooth, PAN):

- Ethernet kapselointi
- Yksittäinen IP pikoverkko
- Master-laitteen suorittama pakettien uudelleen lähetys

- NAP (network access point) eli jonkin laitteen tarjoama yhteys toiseen tietoverkkoon, esim. Internettiin

Profiili kattaakin nykyisellään vain tilanteen, jossa on yksi pikoverko, joka sisältää kahdesta kahdeksaan laitetta, sekä yhden tai useamman NAP:in. Lisäksi verkko on manuaalisesti luotu käyttäjän toimesta. Profiili ei vielä nykyisellään otakkaan kantaa seuraaviin asioihin (Bluetooth, PAN):

- Automaattinen verkon luonti
- Yleinen ad hoc tietoliikenne hajaverkoissa, eli tietoliikenne useamman kuin yhden pikoverkon välillä
- Mahdollisuus käyttää NAP:ia, joka on eri pikoverkossa
- Quality of Service (QoS)

Profiili onkin vielä kehitysvaiheessa. Se ei esimerkiksi mahdollista automaattista verkon luontia ad hoc tapaan, eikä myöskään useamman pikoverkon muodostamaa IP kokonaisuutta. Näin ollen sen tarjoamat mahdollisuudet käytännön sovelluksiin ovat vielä varsin rajatut. Tällaisenaan PAN-verkon käyttö onnistuu vain henkilökohtaisena lähiverkkona, jossa se esimerkiksi kytkee yhteen henkilön matkapuhelimen, kämmenmikron, kannettavan tietokeen ja PC:n. Jatkokehitystä tarvitaankin ylläolevien asioiden ratkaisemiseksi, jotta Bluetooth PAN:it voisivat saavuttaa täyden kapasiteettinsa.

## 4 ONGELMIA JA MAHDOLLISIA RATKAISUJA

Tässä kappaleessa käsitellään joitain Bluetooth PAN-verkkoihin liittyviä ongelmia. Tässä käsiteltäviksi valitut ongelmat on valittu niin, että ne liittyvät läheisesti Bluetooth PAN-verkkoihin, eivätkä niinkään yleisesti ad hoc -verkkoihin tai pelkästään Bluetooth teknologiaan. Bluetooth laitteiden ja Bluetoothin ja WiFin keskinäiset häiriöt on kuitenkin otettu mukaan, koska näitä häiriöitä esiintyy nimeenomaan silloin kun paikalla on paljon Bluetooth laitteita ja näin tapahtuu nimenomaan PAN-verkkojen yhteydessä.

### 4.1 Reititys hajaverkoissa

Reititys nousee tärkeäksi asiaksi heti kun PAN-verkossa on kyse hajaverkosta, eli se sisältää vähintään kaksi erillistä pikoverkkoa. Verkon laitteiden tulee nyt pystyä päättämään, kuinka paketti laitteelta A saadaan kulkemaan laitteelle B, jos laitteet A ja B eivät ole samassa pikoverkossa. Tilannetta ei yhtään helpota se, että kyseessä on ad hoc -verkko, jonka jäsenet liittyvät verkkoon ja poistuvat verkosta, niinkuin niitä huvittaa. Tällöin reitti, jota pitkin yksi paketti on päässyt perille, ei ehkä olekkaan enää olemassa seuraavan paketin yrittäessä kulkea sitä pitkin.

Tämä ongelma tosin on hyvin yleinen koskien ad hoc -verkkoja, joten sitä ei tässä käsitellä enempää. Tätä ongelmaa tosin sivuutetaan vielä seuraavassa kappaleessa.

### 4.2 IP reititys Bluetooth PANissa

Bluetooth PAN-verkkojen käytön ja yleistymisen kannalta on kriittistä, että Bluetooth PAN:eissa voidaan reitittää IP-liikennettä, jotta normaalit TCP ja UDP sovellukset ja protokollat toimivat.

Nyt hajaverkkojen reititys voitaisiin tietysti antaa suoraan IP kerroksen hoidettavaksi, mutta Bluetooth SIG on päättänyt kuitenkin antaa tämän tehtävän sitä varten erityisesti suunnitellulle BNEP (Bluetooth network encapsulation protocol) kerrokselle, joka sijoittuu L2CAP kerroksen päälle (Bluetooth, BNEP). Johanssonin ym. (2001) mukaan tätä valintaa puoltavat muutamat seikat:

- IP-osoitteiden jakaminen DHCP:n (Dynamic Host Configuration Protocol) avulla, johtaa helposti siihen, että IP osoitteet olisivat voimassa vain yhden pikoverkon sisällä, kuten yleensäkin IP-osoitteet eivät enää toimi reitittimien lävitse kuljettaessa ja tällaisessa asemassa ovat Bluetooth laitteet, jotka toimivat siltana kahden pikoverkon välissä
- Toimiakseen tehokkaasti IP kerroksen pitäisi olla yhteydessä alempaan Bluetooth kerrokseen ja tämä sotii sitä IP kerroksen tärkeää ajatusta vastaan, että IP kerroksen pitää olla mahdollisimman itsenäinen
- Pystytään käyttämään myös muitakin reititys protokollia IP:n sijaan

BNEP:n yläpuolelle tulee IP kerros, jolle Bluetooth PAN nyt näkyy yhteinäisenä verkkona, jossa IP kerroksen on helppo toimia. BNEP standardi määrittää vain missä muodossa data pitää lähettää, se ei ota kantaa siihen kuinka reititys hajaverkkojen välillä toteutetaan (Bluetooth, BNEP). Tähän ongelmaan ei myöskään ota kantaa PAN standardi, joka tällä hetkellä määrittää vain miten yhden pikoverkon sisäinen liikenne toimii (Bluetooth, PAN). Tarvittaisiinkin algoritmeja ja testausta siitä, miten BNEP standardi onnistuneesti voisi reitittyä hajaverkoissa.

### **4.3 Verkon topologian tehokkuus**

Langattomien Ad hoc -verkkojen topologian muodostumista on tutkittu jonkin verran aikasemminkin. Nämä tutkimukset vain yleensä perustuvat

teknologiaan, joka käyttää vain yhtä taajutta. Tällaisessa teknologiassa kaikki viestintä tapahtuu vain yhdellä taajuudella ja tällöin laitteiden fyysiset sijainnit vaikuttavat siihen, mitkä laitteet keskustelevat keskenään ja topologia muodostuu hyvinkin paljon itsestään (Salondis T. 2001). Tällainen yhdellä taajudella toimiva teknologia on esimerkiksi WiFi. Bluetooth puolestaan perustuu taajuushyppelylle ja tällöin vain ne laitteet voivat keskustella keskenään, jotka ovat sopineet yhteisestä *taajuushyppely kaavasta* (frequency hopping pattern). Nyt siis laitteiden fyysinen etäisyys toisistaan ei muodosta verkkoja, vaan ainoastaa asettaa rajoja sille, mitkä laitteet voivat keskustella keskenään. Tästä johtuen voidaan Bluetooth PAN:ien saralla käyttää ainoastaa tutkimusta, joka on tehty juuri Bluetooth PAN:eja silmälläpitäen tai yleisemmin koskien usean taajuden tekniikoita.

Topologian tehokkuudesta puhuttaessa pieneksi ongelmaksi nousee myös se, miten mitataan muodostetun verkon hyvyttä. Perinteinen mittarihan on tietoverkkojen tehokkuutta mitattaessa ollut tiedonsiirron nopeus ja viive. Nyt puhuttaessa mobiililaitteista ja *usean hypy verkoista* (multihop network) voidaan mittarina käyttää esimerkiksi sitä, mikä on pisin matka mikä paketin täytyy kulkea päästäkseen laitteelta A laitteelle B. Lisäksi mittarina voidaan käyttää virran kulutusta, sillä kaikki tiedon lähettäminen ja vastaanottaminen kuluttaa mobiilien laitteiden muutenkin niin vähäistä virtaa.

Esimerkiksi Marsan ym. (2001) keskittyvät verkkon topologian luonnissa mahdollisimman pitkäkestoisen verkon luomiseen. Tämä tosin tapahtuu keskitetyn algoritmin voimin, joka laskee optimaaliset master-laitteet ja jakaa sen jälkeen slave-laitteet master-laitteille optimaalisesti. Tällainen ei käytännössä toimi, koska verkot muodostuvat yleensä hiljalleen, eikä niin, että kaikki laitteet ovat kerralla paikalla, muutenkin keskitetty algoritmi ei ole käytännöllinen vaihtoehto mobiiliverkoissa. Lisäksi artikkelissa ei oteta kantaa topologian muuttumiseen.

Myös toisessa artikkelissa Marsan ym. (2002) esittelevät keskitetyn algoritmin Bluetooth PAN-verkon muodostukseen. Tällä kertaa artikkelissa keskitytään enemmän verkon nopeuteen.

Oleellista seuraavaksi olisikin kehittää hajautettu algoritmi ongelman ratkaisemiseksi. Tällainen ratkaisun esittävät Salonidis ym. (2001). Heidän ratkaisunsa on BTCP (Bluetooth Topology Constuction Protocol) protokolla, joka voidaan implementoida nykyisen Bluetooth protokollaston päälle ja joka pitää huolen topologian muodostamisesta. Tosin tässäkin tutkimuksessa ei oteta kantaa topologian muuttumiseen, vaan tämäkin ratkaisu vaatii rinnalleen vielä toisen ratkaisun, joka pitää huolta topologian muutoksista, kun laitteet liikkuvat verkossa ja myös poistuvat verkosta.

Tan ym. (2001) puolestaan ottavat kantaa myös topologian muuttumiseen. He esittävät Bluetooth PAN:n rakentamista TSF (Tree Scatternet Formation) algoritmin avulla. TSF algoritmi muodostaa verkon puuksi. Tämä yksinkertaistaa verkon topologiaa ja helpottaa myös reititystä hajaverkkojen välillä. Tosin puu-rakenne ei ehkä aina ole kaikista optimaalisin rakenne, esimerkiksi kun juurisolmu haluaa keskustella jonkin lehtisolmun kanssa. TSF algoritmi on kuitenkin siinä mielessä kehittynyt, että se yrittää kokoajan optimoida puun rakennetta ja mahdollistaa solmujen poistumisen ja uusien tuleminen tilalle. Näin ollen se tarjoaa hyvän vertailukohteen uusille algoritmeille.

Mielestäni topologian ylläpitäminen on erittäin kriittinen osa Bluetooth PAN:eja. Bluetooth laitteiden kantama on hyvin pieni, tästä johtuen laitteet liikkuvat herkästi pois omasta pikoverkostaan ja tämä vaatii nopeita muutoksia verkon topologiassa. Lisäksi topologian on pystyttävä optimoimaan rakennettaan, että reitit eri laitteiden välillä olisivat kokoajan mahdollisimman lyhyitä.



Ongelmaksi tosin muodostuu se, että kuinka raskas tällaisen verkkoa ylläpitävän algoritmin tulisi olla. Monimutkainen algoritmi kyllä luultavasti pitää verkon topologian tehokkaampana, mutta luultavasti kuluttaa enemmän resursseja kuten laskentatehoa ja verkon kapasiteettia. Hyvin yksinkertainen algoritmi puolestaan ei vaadi juurikaan ylimääräistä laskentatehoa tai verkon kapasiteettia, mutta päästää verkon helposti huonoon kuntoon. Tulisi siis löytää jonkinlainen tasapaino näiden kahden ääripään välille.

#### **4.4 Pikoverkkojen välinen aikataulutus**

Yksi Bluetooth laite voi olla läsnä useammassa pikoverkossa. Tällöin tuo laite voi toimia normaalisti molemmissa pikoverkoissa, sekä myös toimia siltana niiden kahden tai useamman pikoverkon välillä mahdollistaen pikoverkkojen välisen liikenteen.

Laiteen toimiessa kahdessa pikoverkossa, joutuu se jakamaan aikansa niiden kahden eri verkon välillä, koska laitteessa luultavasti on vain yksi Bluetooth lähetin ja yksi lähetin voi kerrallaan vastaanottaa tai lähettää yhdellä taajuudella. Ongelmaksi nyt muodostuu se, että pitää olla sovittu algoritmi, jolla laite osaa jakaa aikansa molemmille pikoverkoille oikeaan aikaan. Tällaista algoritmia sanotaan *IPS* (interpiconet scheduler) algoritmiksi. Bluetooth PAN profiili ei ota vielä kantaa IPS algoritmiin. Aihe on siis ajankohtainen ja siitä onkin viimeaikoina tehty paljon tutkimusta.

Huono IPS algoritmi voi aiheuttaa suuria viiveitä jo kahden pikoverkon väliselle viestinnälle, puhumattakaan suuremmista hajaverkoista, joissa viestit kulkevat jopa kymmenen pikoverkon kautta.

Tietenkin sovelluksesta riippuu, kuinka paljon viivettä saa olla. Esimerkiksi kaksisuuntainen puheyhteys, ei siedä suuriakaan viiveitä, ilman että se häiritsee käyttäjää. Toisaalta sähköpostin vastaanottaminen saa kestää hieman pidempään, ilman että se aiheuttaa käyttäjälle kohtuuttomia vaikeuksia.

Eräs tapa pikoverkkojen aikataulukseen ovat *tapaamisajat* (Rendezvous point) (Johansson P. 2002). Tällöin laitteet sopivat keskenään, milloin ne keskustelevat keskenään. Eli Master-laite lähettää tuolloin paketin slave-laitteelle ja slave-laite on luvannut tuolloin kuunnella tuota taajutta.

Tapaamisaika algoritmi määrittelee aina seuraavat asiat (Johansson P. 2002):

- Kuinka tapaamisajat sovitaan: esim. sovitaanko ne joka tapaamiskerralla, vai luodaanko jokin sykli, jota molemmat laitteet noudattavat.
- Kuinka tiukasti tapaamisajoista pidetään kiinni: pitävätkö master- ja slave-laitteet molemmat tiukasti kiinni tapaamisajoista, vai saako esim. toinen laite luistaa noista tapaamisista.
- Tapaamisen pituus: onko tapaamisella, joku sovittu pituus, siirretäänkö niin paljon dataa kuin on siirrettävää vai päättääkö toinen laite tapaamisen pituuden.

Johansson ym. (2002) esittelevät MDRP (The Maximum Distance Rendezvous point) algoritmin, joka perustuu tapaamisaikoihin. MDRP algoritmissa molemmat laitteet pitävät kiinni tapaamisajoista ja master-laite päättää siirrettävän datan määrä joka tapaamiskerralla erikseen. Algoritmi perustuu idealle, että aika tapaamisien välillä on aina mahdollisimman suuri ja joka kohtaamisella sovitaan seuraava tapaamisaika.

Artikkelissa myös simuloidaan algoritmin tehokkuutta. Algoritmi toimii suhteellisen hyvin, mutta joissain tapauksissa ääni-lähetyksille tulee liikaa viivettä. Tosin tämäkin saadaan korjattua, jos ääni-liikenteelle annetaan suurempi prioriteetti kuin normaalille TCP/IP liikenteelle.

Ráczy ym. (2001) esittelevät toisen tyyppisen ratkaisun, joka perustuu PCSS (Pseudo-Random Coordinated Scatternet Scheduling) algoritmiin. PCSS algoritmi perustuu pseudo arvottuun sarjaan tapaamisaikoja. Molemmilla

laitteilla on oma intensiteetti, jolla ne noudattavat noita tapaamisaikoja. Tämä intensiteetti voi dynaamisesti nousta tai laskea siirrettävän datan määrän mukaan. Tällöin algoritmi siis sopeutuu verkon kuormitukseen. Algoritmi on hyvin yksinkertainen ja simuloinnin mukaan kohtalaisen tehokaskin. Yksi algoritmin hyviä puolia on myös alempi virrankulutus, koska verkon kuormituksen ollessa alempi myös laitteet kommunikoivat vähemmän.

Monia erillaisia algoritmeja onkin tarjolla lukuisissa tutkimuksissa, mutta algoritmien vertailuja ei ole tehty. Tämä olisikin kriittistä PAN-profiilin kehityksen kannalta.

#### **4.5 Bluetooth laitteiden aiheuttama keskinäinen häiriö**

Langattomissa verkoissa tapahtuu häiriötä, kun kaksi eri lähetystä tapahtuu toistensa kantaman sisällä samalla taajudella samaan aikaan. Tällöin tapahtuu *törmäys* (collision). Törmäyksen tapahduttua lähetetty paketti mahdollisesti korruptoituu ja tästä johtuen vastaanottava laite joutuu tiputtamaan paketin ja pyytämään uudelleen lähetystä. Tällöin tapahtuu *paketti häviötä* (packet loss). Eli kun paketti häviää, joudutaan se lähettämään uudestaan, mikä tietenkin kuormittaa verkkoa ja näin ollen mitä suurempi paketti häviö, sitä hitaammin verkko toimii. Paketti häviö aiheuttaa ongelmia etenkin audiota siirrettäessä SCO yhteydellä, jota käytetään nimenomaan puheen siirtämiseen. SCO yhteydessä hävinnyttä pakettia ei lähetetä uudestaan ja tällöin jos paketteja häviää liikaa, tulee puhe katkonaiseksi ja siitä ei saa enää selvää.

Zürbes ym. (2000) ovat tutkineet Bluetooth laitteiden toisilleen aiheuttamaa häiriötä. He simuloivat huonetta, joka on kooltaan 10m\*20m ja jossa on 100 yhtäaikaista Bluetooth yhteyttä. Tutkimuksessa todetaan, että Bluetooth yhteyksien toisilleen aiheuttamat häiriöt aiheuttivat vain noin 5% tiputuksen Bluetooth yhteyksien kapasiteetissa. Simulaatiossa Bluetooth laitteiden tiheys on tarpeeksi suuri verrattuna Bluetooth laitteiden mahdolliseen tiheyteen reaaliworldissa, jotta sitä voidaan totuudenmukaisena simulaationa

reaalimaailmasta. Tutkimuksessa päästiinkin johtopäätökseen, että Bluetooth-laitteiden taajuushyppely ja toteutus estää tehokkaasti häiriöitä. Artikkelissa vielä todettiin, että pidempien pakettien käyttö vähentää häiriöitä entisestään.

#### **4.6 Bluetoothin ja IEEE 802.11b:n (WiFi) häiriö**

Bluetoothin lisäksi tällä hetkellä nousemassa on myös toinen tärkeä langaton tekniikka - IEEE 802.11b (WiFi). Molemmat näistä standardeista liikennöivät samalla rekisteröimättömällä 2.4 GHz:n taajuudella. Tästä johtuen ne väistämättä häiritsevät toisiaan toimiessaan samalla alueella samaan aikaan.

Bluetoothin ja WiFin häiriö on erittäin tutkittu Bluetooth-tekniikan osa-alue. Suurin osa tutkimuksesta on analyyttisiä laskelmia ja simulointeja, mutta myös jonkin verran todellista testausta on tehty. Todelliset testaukset yleensä tosin käyttävät hyvin pieniä määriä laitteita ja tämän takia ovat lähinnä suuntaa antavia. Simuloinneissa käytetään yleensä hyvin suuria määriä laitteita ja siksi mielestäni onkin perusteltua pystyä luottamaan niiden tuottamiin arvioihin.

Golmie ym. (2001) ovat arvioineet ja simuloineet Bluetoothin ja WiFin keskinäistä häiriötä. Tutkimuksen lopullinen arvio oli, että WiFi-verkon toiminta Bluetooth-verkon toiminta-alueella voi aiheuttaa Bluetooth-verkolle jopa 25% paketti häviön.

Toisessa tutkimuksessaan Golmie ym. (2003) simuloivat näiden kahden järjestelmän välistä häirintää useissa erillisissä tilanteissa, joissa WiFi ja Bluetooth-laitteiden määrä, verkon kuormitus, laitteiden sijainti ja tiedonsiirron tyyppi vaihtelevat. Näin tutkimuksessa yritettiin saada tarkempia ja yleisempiä tuloksia, joista tärkeimmät olivat:

- Verkon kuormituksen lisääntyminen nostaa myös molempien verkkojen kärsimää häiriötä

- WiFi:n lähetystehon nosto ei laske WiFi:n kärsimää häiriötä, mutta nostaa Bluetooth verkon pakettihäviötä
- Hitaampi hyppely Bluetooth verkoilla (esim. Pidemmät pakettien pituudet) vähentää WiFi:n kärsimää häiriötä
- Bluetoothin audio lähetykset (SCO) aiheuttavat eniten häiriötä WiFi:lle
- Häiriötä poistava koodi ei auta tilannetta, koska häiriötä on yleensä liikaa korjattavaksi

Tutkimus painottaa, että tärkeää olisikin kehittää mekanismeja, jotka mahdollistaisivat molempien verkkojen yhtäaikaisen olemisen.

#### 4.7 Turvallisuus

Langattomien laitteiden tietoturva yleisesti ja myös Bluetooth laitteiden tietoturva on niin laaja aihe, että sitä ei tässä käsitellä kattavasti. Yleisesti voitaneen kuitenkin todeta, että langattomien verkkojen tietoturvallisuus on aina hankala asia toteuttaa, varsinkin kun verkot ovat ad hoc tyyppisiä. Lisäksi vaikka Bluetooth suunniteltiin alunperin turvallisuus mielessä, se että sitä suunniteltaessa on ollut tavoitteena myös alhainen hinta, tehokkuus ja ad hoc tyyppiys, on heikentänyt Bluetoothin turvallisuutta (Jones A. 2001). Tosin Jones tuo myös sen esille, että Bluetooth arkkitehtuuri on niin joustava, että siihen voidaan helposti lisätä sovellustasolle ylimääräisiä turvallisuuskomponentteja, joka parantaa niitä mahdollisuuksia joihin Bluetooth pystyy. Sellaisenaan esimerkiksi rahaliikenteeseen ei Jones sitä suosittele.

## 5 YHTEENVETO

Langattoman tiedonsiirron merkitys tulee kasvamaan tulevaisuudessa ja tarvitaan tekniikoita sen toteuttamiseksi. Bluetooth on kehitetty ratkaisemaan tätä tarvetta. Vaikka se alunperin olikin suunniteltu vain johtojen korvaajaksi, on se tällä hetkellä myös nousemassa PAN-verkkojen toteuttajaksi.

Bluetooth pohjaiset PAN-verkot ovatkin varsin lupaava mahdollisuus. Vaikka ne perusrakenteeltaan ovatkin hyvin yksinkertaisia, on niissä kuitenkin vielä useita teknisiä yksityiskohtia jotka tulee ratkaista. Tärkeimmät ratkaistavat ongelmat tällä hetkellä ovat mielestäni verkon topologian tehokkuuden varmistaminen ja reititys hajaverkoissa. Näiden jälkeen seuraavaksi tärkein ratkaistava ongelma on Bluetoothin ja WiFi:n keskinäinen häiriö, jotta Bluetooth PAN:it voidaan ottaa käyttöön suuressa määrin. Tämän lisäksi myös Bluetooth PAN:ien tietoturva pitäisi kehittää, jotta ne voitaisiin ottaa suuressa määrin käyttöön myös yritysmaailmassa ja ehkä myös kaupankäynnissä.

Kunhan Bluetooth PAN-verkkojen ongelmat saadaan ratkaistuksi ja Bluetooth SIG:n PAN-profiili saadaan muotoon, jossa se mahdollistaa automaattisesti muodostuvat hajaverkot, niin silloin päästään näkemään Bluetooth PAN:ien todelliset mahdollisuudet. Bluetooth PAN:it tulevatkin avaamaan uusia mahdollisuuksia langattomassa viestinnässä. Tarvittaisiinkin siis myös uusia sovelluksia ja palveluita Bluetooth PAN:eille vauhdittamaan niiden yleistymistä.

## LÄHDELUETTELO

Bluetooth SIG. <<http://www.bluetooth.org>>

Bluetooth, Core Specifications v1.1. 2001. Saatavilla www-muodossa:  
<<http://www.bluetooth.com>>

Bluetooth, BNEP Specification v.095a. 2001. Saatavilla www-muodossa:  
<<http://www.bluetooth.com>>

Bluetooth, PAN Profile v1.0. 2003. Saatavilla www-muodossa:  
<<http://www.bluetooth.com>>

Golmie N. & Mouveaux F. 2001. Interference in the 2.4 GHz ISM band: impact on the Bluetooth access control performance. Konferenssi julkaisussa Communications, 2001. ICC 2001. International Conference on. Saatavilla www-muodossa: <<http://www.ieee.org>>

Golmie N., Van Dyck R.E., Soltanian A., Tonnerre A. & Rébala O. 2003. Interference Evaluation of Bluetooth and IEEE 802.11b Systems. Julkaisussa Wireless Networks, volume 9, issue 3. Saatavilla www-muodossa: <[www.kluweronline.com/issn/1022-0038](http://www.kluweronline.com/issn/1022-0038)>

Johansson P., Kazantzidis M., Kapoor R. & Gerla M. 2001. Bluetooth: an enabler for personal area networking. Julkaisussa IEEE Network, volume 15, issue 5. Saatavilla www-muodossa: <[www.ieee.org](http://www.ieee.org)>

Johansson P., Kapoor R., Kazantzidis M. & Gerla M. 2002. Rendezvous scheduling in Bluetooth scatternets. Konferenssi julkaisussa Communications, 2002. ICC 2002. IEEE International Conference on. Saatavilla www-muodossa: <<http://www.ieee.org>>

- Jones A., Lu Z., Yu Y. & Gu C. 2001. A Case study of Wireless Personal Area Network Security: Bluetooth Security. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa.com): <<http://www.people.virginia.edu/~yy6m/project.pdf>>
- Jordan R. & Abdallah C. T. 2002. Wireless Communications and Networking: An Overview. Julkaisussa IEEE Antenna's and Propagation Magazine, volume 44, No. 1. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa.com): <[www.ieee.org](http://www.ieee.org)>
- Marsan A. M., Chiasserini C.F. & Nucci A. 2001. Optimal Topology Design in Wireless Personal Area Networks. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa.com): <<http://www.sprintlabs.com/People/anucci/Papers/3GIS01.pdf>>
- Marsan A. M., Chiasserini C.F., Nucci A., Carello G. & Giovanni L 2002. Optimizing the topology of Bluetooth Wireless Personal Area Network. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa.com): <<http://www.ieee-infocom.org/2002/papers/191.pdf>>
- Rácz A., Miklós G., Kubinszky F. & Valkó A. 2001. A Pseudo Random Coordinated Scheduling Algorithm for Bluetooth Scatternets. Konferenssi julkaisussa Proceedings of the 2001 ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa.com): <<http://portal.acm.org>>
- Salonidis T., Bhagwat P., Tassiulas L. & LaMaire R. 2001. Distributed Topology Construction of Bluetooth Personal Area Networks. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa.com): <<http://www.winlab.rutgers.edu/~pravin/publications/papers/infocom2001.pdf>>
- Tan G., Miu A., Gutttag J. & Balakrishnan H. 2001. Forming scatternets from Bluetooth Personal Area Networks. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa.com): <<http://nms.lcs.mit.edu/projects/blueware/tr826.pdf>>



Zürbes S., Stahl W., Matheus K. & Haartsen J. 2000. Radio network performance of Bluetooth. Konferenssi julkaisussa Communications, 2000. ICC 2000.

IEEE International Conference on. Saatavilla www-muodossa:

<<http://www.ieee.org>>