

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN KORKEAKOULU
TIETOTEKNIIKAN OSASTO

**PAIKKATIEDON KERÄÄMINEN JA
HYÖDYNTÄMINEN WLAN-VERKOSSA**

Diplomityön aihe on hyväksytty Lappeenrannan teknillisen korkeakoulun tietotekniikan osaston osastoneuvoston kokouksessa 13.2.2002.

Työn tarkastajana toimi professori Jari Porras ja ohjaajana TkT Jouni Ikonen.

Lappeenrannassa 13.3.2002

Antti Seppänen
Teknologiapuistonkatu 2 D 48
53850 Lappeenranta

TIIVISTELMÄ

Tekijä: Seppänen, Antti
Nimi: **Paikkatiedon kerääminen ja hyödyntäminen WLAN-verkossa**
Osasto: Tietotekniikan osasto
Vuosi: 2002
Paikka: Lappeenranta

Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. 66 sivua, 26 kuvaa, 8 taulukkoa ja 6 kaavaa.

Tarkastaja: Professori Jari Porras
Hakusanat: wlan, paikannus, langaton, verkko

Työn teoriaosuudessa tutustutaan ensin yleisimpiin paikannusmenetelmiin. Käsiteltävänä ovat GPS-satelliittipaikannus sekä radiosoluverkkojen paikannusmenetelmät solupaikannuksesta monimutkaisempiin signaalin ominaisuuksia tutkiviin menetelmiin. Teoriaosuudessa käsitellään myös IEEE 802.11 –standardin PHY- ja MAC-kerrosten toimintaa sekä WLAN-verkon siirtotien ominaisuuksia paikannuksen kannalta. Ennen paikannusjärjestelmän toteuttamista työssä esitellään menetelmiä ja tuloksia muista tutkimuksista samalta tutkimusalueelta.

Työssä toteutetaan paikannusjärjestelmä sekä solupaikannusta että signaalitasopaikannusta hyödyntäen. Solupaikannusjärjestelmälle määritellään palvelurajapinta, jonka kautta paikannuspalvelua voidaan hyödyntää muissa palveluissa. Kaksi paikannuspalvelun päälle luotua palvelua esitellään lyhyesti malliesimerkkeinä. Signaalitasopaikannuksen osalta kuvataan kaksi menetelmään kuuluvaa vaihetta ja yksittäisten komponenttien toiminta näissä vaiheissa. Paikannusmenetelmien tarkkuutta tutkitaan mittausten avulla ja testituloksista muodostetaan paikannustarkkuutta kuvaavat tilastot. Solupaikannuksen keskimääräinen virhe on ± 50 metriä. Vastaavasti signaalitasopaikannuksen virhe on ± 4 metriä ja parannettua algoritmia käyttäen ± 3 metriä.

ABSTRACT

Author: Seppänen, Antti

Subject: **Gathering and using location information in WLAN**

Department: Information technology

Year: 2002

Place: Lappeenranta

Master's Thesis. Lappeenranta University of Technology 66 pages, 26 figures, 8 tables and 6 equations.

Supervisor: Professor Jari Porras

Keywords: wlan, location, wireless, network

In the theory part of this thesis the most common positioning methods are first introduced. Among the discussed methods are the GPS-satellite positioning and positioning in radio cell networks using techniques from a cell positioning to a more complex signal propagation procedures. The theory part also covers the PHY and MAC layers of the IEEE 802.11 standard and the characteristics of a WLAN medium concerning positioning. Before implementing the positioning system methods and results from other research works covering the same research area are reported.

Two positioning systems are implemented in this thesis utilizing cell positioning and signal level positioning. The application program interface is defined for cell positioning system and that can be used by other services taking advantage of the positioning service. Two of these services are shortly introduced as examples. Concerning signal level positioning two phases of this method and the operations of the included components are described. The positioning accuracies of these methods are measured and corresponding statistics are compiled. The mean errors of cell positioning, signal level positioning and signal level positioning with enhanced algorithm are ± 50 , ± 4 and ± 3 meters, respectively.

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Lappeenrannan teknillisen korkeakoulun tietoliikennetekniikan laitoksella WLPR-projektille.

Kiitän diplomityöni tarkastajaa professori Jari Porrasta sekä ohjaajaa TkT Jouni Ikosta neuvoista sekä ohjauksesta työni kirjoittamisen aikana.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	i
ABSTRACT	ii
ALKUSANAT	iii
SISÄLLYSLUETTELO	iv
LYHENTEET	vi
1 JOHDANTO	1
2 PAIKANNUSMENETELMÄT	3
2.1 Satelliittipaikannus	3
2.1.1 GPS	3
2.1.2 AGPS.....	5
2.2 Paikannusmenetelmät radiosoluverkoissa.....	5
2.2.1 Solupaikannus	6
2.2.2 Signaalin voimakkuus	7
2.2.3 Signaalin saapumisaika	8
2.2.4 Signaalin saapumisaikaerotus	9
2.2.5 Signaalin saapumissuunta	9
3 IEEE 802.11 -STANDARDI	11
3.1 Verkkotopologiat.....	11
3.1.1 IBSS	11
3.1.2 ESS	12
3.1.3 Asemien liikkuvuus	13
3.2 PHY.....	13
3.2.1 FHSS	14
3.2.2 DSSS	14
3.2.3 Infrapunatekniikka	17
3.3 Radiotien ominaisuudet.....	17
3.3.1 Tehorajoitukset.....	17
3.3.2 Etenemisvaimennus.....	18
3.3.3 Monitie-eteneminen	20
3.3.4 Häiriötekijät.....	20
3.4 MAC-kerros	21
3.4.1 CSMA/CA.....	21
3.4.2 Ongelma siirtotien varauksessa.....	22
3.4.3 Kehysten uudelleenlähetys	23
3.4.4 Kilpavaraukseton siirtotien hyödyntäminen.....	24
3.4.5 MAC-kehyksen muoto	25
4 PAIKANNUS WLAN-VERKOSSA	32
4.1 Signaalitasomittaukset paikannuksessa.....	32

4.2	Signaalitasojen suodatus	34
4.3	Aikamittaukset paikannuksessa	36
4.4	Älykkäät paikannusjärjestelmät	38
5	PAIKANNUSPALVELUN TOTEUTTAMINEN	40
5.1	Toteutusympäristö	41
5.2	Solupaikannus	42
5.2.1	Solupaikannuksen toteutus	42
5.2.2	Paikannustarkkuus	44
5.2.3	Paikannuspalvelu	45
5.2.4	Sovellusrajapinta	46
5.2.5	Paikannusta hyödyntävät palvelut	47
5.3	Paikannus signaalin voimakkuuteen perustuen	48
5.3.1	Alustusvaihe	49
5.3.2	Paikannusvaihe	50
5.3.3	Päätelaite	51
5.3.4	Palvelin	52
5.3.5	Tietokanta	54
5.3.6	Paikannustarkkuus	55
6	PÄÄTELMÄT	61
	LÄHTEET	63

LYHENTEET

ACK	Acknowledgement
AGPS	Assisted Global Positioning System
AOA	Angle of Arrival
ARQ	Automatic Repeat-request
BSS	Basic Service Set
BSSID	Basic Service Set Identifier
CCITT	Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique
CF	Contention Free
COO	Cell of Origin
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection
dB	Desibeli
dBm	Desibelimilliwatti
DCF	Distributed Coordination Function
DGPS	Differential Global Positioning System
DS	Direct Sequence
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EKF	Extended Kalman-Filter
ESS	Extended Service Set
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCC	Federal Communications Commission
FH	Frequency Hopping
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
GHz	Gigahertsi
GLONASS	GLOBAL 'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GPS	Global Positioning System
GRP	Geolocation Reference Point
GSM	Global System for Mobile communication
HTTP	Hypertext Transfer Protocol

IAPP	Inter-Access Point Protocol
IBSS	Independent Basic Service Set
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
MAC	Medium Access Control
Mb/s	Megabittiä sekunnissa
MHz	Megahertsi
MIB	Management Information Base
NAV	Network Allocation Vector
NAVSTAR	Navigation Signal Timing and Ranging
PCMCIA	Personal Computer Memory Card International Association
PHY	Physical
PCF	Point Coordination Function
RADIUS	Remote Authentication Dial-In User Service
Rx-level	Receive level
SIFS	Shortest Interframe Space
SNMP	Simple Network Management Protocol
SSID	Service Set Identifier
TOA	Time of Arrival
TDOA	Time Difference of Arrival
TIM	Traffic Indication Map
UDP	User Datagram Protocol
WAF	Wall Attenuation Factor
WEP	Wired Equivalent Privacy
WLAN	Wireless Local Area Network
WWW	World Wide Web
XML-RPC	Extensible Markup Language – Remote Procedure Call

1 JOHDANTO

Kannettavien päätelaitteiden yleistyessä tarve paikannukselle kasvaa jatkuvasti. Operaattorit haluavat luoda verkkoihinsa lisäarvopalveluja, joiden joukkoon paikannuskin lukeutuu. Paikannustekniikoihin suunnattua tutkimusta ovat lisänneet myös uudet säännökset Yhdysvalloissa, joiden mukaan matkapuhelintekniikan on mahdollistettava laitteen paikantaminen hätätilanteissa. Euroopan Unionin alueellakin ollaan laatimassa yhteistä virallista suositusta hätäpuheluiden paikantamiskäytäntöön, mutta tällä hetkellä paikannuspalveluiden kehitystä vauhdittavat enemmän kaupalliset visiot paikannuksen hyödyntämisestä kasvavilla markkinoilla.

Matkapuhelinten ohella ovat yleistyneet myös kannettavat tietokoneet ja erilaiset PDA-laitteet, joiden laskentateho on perinteisiin matkapuhelimiin verrattuna paljon suurempi. Näiden laitteiden verkkoyhteys voidaan toteuttaa langattomasti käyttäen radioyhteyttä. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.11 -standardin määrittelemä WLAN (Wireless Local Area Network) -tekniikka on yksi vaihtoehto langattomalle tiedonsiirrolle. WLAN-tekniikan hyödyntäminen kaapeloitujen verkkoyhteyksien korvaajana on jo melko yleistä yrityksissä ja myöskin kotitalouksiin on alueittain mahdollista saada langaton verkkoyhteys. WLAN-tekniikkaa kehitetään jatkuvasti ja uudistunut, nopeampia yhteyksiä mahdollistava standardi on juuri valmistunut, joten tulevaisuus näyttää lupaavalta ja markkinoiden odotetaan kasvavan.

Vaikka lain asettamat paikannusvaatimukset tulevatkin koskemaan vain matkapuhelinverkkoja, on päätelaitteen paikannusmahdollisuus myös WLAN-verkoissa haluttu ominaisuus. Paikannukselle löytyy lukuisia käyttökohteita reittiopastuksesta päätelaitteiden seurantaan. Sovelluksesta riippuen paikannustarkkuusvaatimus voi vaihdella metreistä kilometreihin. Tarkkuusvaatimus onkin yksi ratkaiseva tekijä paikannusmenetelmää valittaessa. Sisätiloissa käytettävissä sovelluksissa paikannuksen tarkkuusvaatimus voi olla muutamien metrien luokkaa ja tämä vaatimus on täytettävissä WLAN-tekniikkaan perustuvilla paikannusjärjestelmillä. Standardi ei itsessään määrittele menetelmää paikannukseen, mutta se antaa hyvät valmiudet soveltaa tunnettuja paikannusmenetelmiä päätelaitteen sijainnin määrittämiseksi. Suuren

laskentatehonsa ja tiedonsiirtokapasiteettinsa ansiosta WLAN-tekniikalla varustetut päätelaitteet soveltuvat hyvin myös monimutkaisten sovellusten ajamiseen paikannusjärjestelmää hyödyntäen.

Tässä diplomityössä perehdytään tunnettuihin radiosoluverkkojen paikannusmenetelmiin ja IEEE 802.11 -standardiin, joiden pohjalta tutkitaan WLAN-tekniikan mahdollisuuksia paikannusjärjestelmän toteuttamiseksi. Paikannus suoritetaan vähintään tukiasemasolun tarkkuudella ja tarkemminkin, mikäli tätä tarkoitusta varten kehitettyä asiakasohjelmaa käytetään apuna paikannuksessa. Peruseriaatteena on siis toteuttaa päätelaitteen paikannus ilman ylimääräistä, WLAN-verkon arkkitehtuuriin kuulumatonta laitteistoa.

2 PAIKANNUSMENETELMÄT

Tässä kappaleessa esitellään tämän hetken yleisimmät paikannusmenetelmät sekä satelliitti- että radiosoluverkkopaikannuksessa. Esiteltävät satelliittijärjestelmät on erityisesti suunniteltu paikannustarkoitukseen, kun taas radiosoluverkoissa paikannus pyritään toteuttamaan verkon normaalin käyttötarkoituksen, tiedonsiirron, ohella.

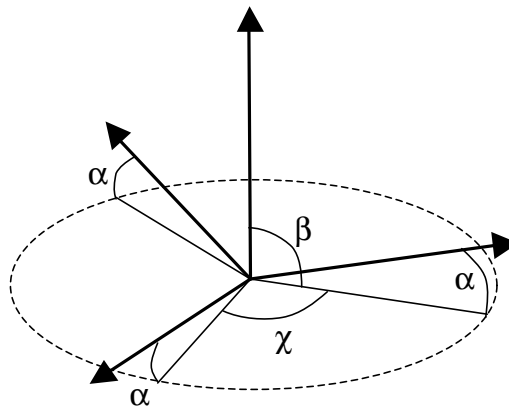
2.1 Satelliittipaikannus

Paikannuksen mahdollistavia rekisteröityjä satelliittijärjestelmiä on kaksi. [Lar98] Tunnetumpi näistä on NAVSTAR (Navigation Signal Timing and Ranging) GPS (Global Positioning System), joka on Yhdysvaltojen toteuttama maailmanlaajuinen 24 satelliitin järjestelmä. Vähemmän tunnettu venäläinen järjestelmä, GLONASS (GLOBAL 'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema), on kärsinyt taloudellisista vaikeuksista ja järjestelmän kehitystyö on ollut hidasta. Myös GLONASS-järjestelmässä on 24 satelliittia. Kumpaakin järjestelmää samanaikaisesti hyödyntäviä vastaanottimia on kehitetty ja näiden vastaanottimien paikannustarkkuus on parempi kuin kummankaan järjestelmän yksinään mahdollistama tarkkuus.

2.1.1 GPS

GPS-paikannusjärjestelmän toiminta perustuu tarkkaan signaalien saapumisajan mittaukseen. Paikannuksen suorittamiseksi vastaanottimessa tarvitaan tiedot satelliittien ajasta ja sijainnista sekä tieto vastaanottimen ja satelliittien välisestä etäisyydestä. Mikäli jokin näistä tiedoista on selvittämättä, ei paikannusta voida suorittaa. Satelliitit on synkronoitu keskenään tarkasti GPS-aikaan ja ne lähettävät jatkuvasti sijainti- ja aikatietoja sisältävää signaalia maahan. GPS-vastaanotin mittaa signaalien saapumisajat ja laskee niiden erotuksen. Tuloksena saadaan vastaanottimen sijainti suhteessa satelliitteihin, ja kun satelliittien sijainti on tiedossa, voidaan myös vastaanottimen sijainti laskea näitä tietoja käyttäen. GPS-järjestelmän paikannustarkkuus on noin 10 metriä.

Teoriassa kolmesta satelliitista vastaanotetut signaalit riittävät paikannukseen, mutta käytännössä laskentaan käytetään usein neljää satelliittia. Syynä tähän on laitevalmistajien tarve minimoida vastaanottimen hinta ja tällöin halvan, mutta huonolaatuisen kellopiirin vuoksi myös ajastustarkkuus voi olla huono. Tarkkuuteen vaikuttaa myös satelliittien sijainti, joka ei käytännössä aina ole ihanteellinen. Ihanteellinen satelliittien asento paikannuksen tarkkuuden kannalta näkyy kuvassa 1, jossa GPS-vastaanotin sijaitsee ympyrän keskipisteessä. Nuolet kuvaavat satelliittien suuntia vastaanottimesta katsottuna. Yksi satelliiteista on suoraan vastaanottimen yllä kulman β ollessa 90° ja sivuilla sijaitsevien satelliittien väliset kulmat χ ovat 120° . Satelliittien pystykulmien α on oltava yli 10° horisontin yläpuolella tarkan paikannuksen aikaansaamiseksi. Tämän raja-arvon alittavien satelliittien signaalit kärsivät ilmakehän vaikutuksesta radioaaltojen etenemiseen.



Kuva 1: Ihanteellinen tilanne GPS-paikannuksessa

Paikannus GPS-järjestelmän avulla vaatii erillisen GPS-vastaanottimen ja tämä voidaan nähdä haittana arvioitaessa järjestelmän sopivuutta paikannuspalveluiden tuottamiseksi massamakkinoille. Tästä johtuen paikannusta hyödyntävien palveluiden kannalta GPS-järjestelmää mielenkiintoisempia kohteita ovat matkapuhelinverkkoihin soveltuvat paikannusjärjestelmät. GPS-piirien halventuessa tulee paikannuksen integroiminen esimerkiksi matkapuhelimiin kannattavaksi. Tällä hetkellä GPS-paikannus on jo mahdollista yhdessä Benefonin matkapuhelinmallissa.

Toinen ongelmakohta GPS-järjestelmälle on paikannus sisätiloissa tai yleensäkin alueilla, joilla vastaanotettavien signaalien voimakkuus on huomattavasti heikentynyt. Tämän ongelman poistamiseksi on kehitetty AGPS- (Assisted Global Positioning System) järjestelmä.

2.1.2 AGPS

AGPS-järjestelmässä radiosoluverkkoa hyödynnetään GPS-signaalin sisältämän tiedon siirtämiseen päätelaitteelle. Verkon tukiasemissa täytyy tällöin olla GPS-vastaanottimet, jotta satelliittien lähettämä signaali voidaan vastaanottaa. Verkon välityksellä lähetetty tieto voi koostua satelliittien ajasta ja sijainnista, mutta päätelaitteen on itse vastaanotettava signaali, josta lasketaan etäisyys päätelaitteen ja satelliittien välillä. Tukiasemien lähettämän avustetiedon mukaan voidaan laskea päätelaitteen lopullinen sijainti. Avustetiedon lisäksi radioverkon välityksellä voidaan päätelaitteelle lähettää myös tukiasemien laskemia DGPS-korjaustietoja (Differential Global Positioning System), joiden avulla voidaan osittain korjata paikannusvirheitä vastaanottimessa.

Ulkona ja hyvällä satelliittiyhteydellä kykenee DGPS-korjauksin parannettu AGPS-järjestelmä muutamien metrien paikannustarkkuuteen. Sisätiloissa järjestelmän tarkkuus on muutaman kymmenen metrin luokkaa. [Syr01]

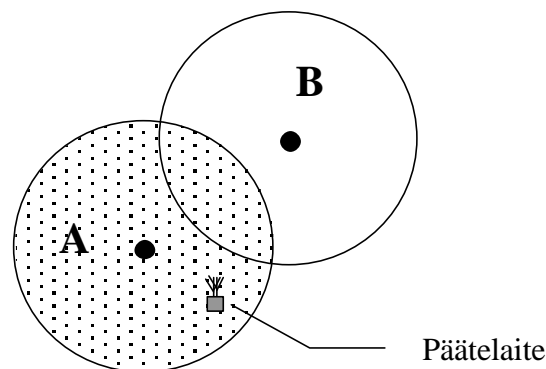
2.2 Paikannusmenetelmät radiosoluverkoissa

Radiosoluverkoissa aseman paikantaminen on mahdollista suorittaa monella eri tavoin. Yksinkertaisimmillaan paikannus voi perustua sijainnin määrittämiseen aseman käyttämän tukiaseman perusteella, mutta tarkempia paikannustuloksia saadaan menetelmillä, jotka perustuvat radioaaltojen fyysisten ominaisuuksien mittauksiin yhdistettynä aaltojen etenemiskäyttäytymisen teoriaan. Paikannuksessa hyödynnettäviä ominaisuuksia ovat radiosignaalin etenemisnopeus, sen vaimeneminen suhteessa etäisyyteen sekä signaalin saapumissuunta. [Syr01]

Radiosignaaleja tulkittaessa on huomioitava signaalin muuttumisen mahdollisuus, joka voi johtaa virhemarginaalin kasvamiseen paikannustuloksessa. Muutokset signaalissa johtuvat radioaaltojen heijastumisesta ja taitumisesta esteisiin törmätessään. Tästä on seurauksena aallon monitie-eteneminen. Radioaaltojen monitie-eteneminen tarkoittaa signaalin siirtymistä lähettimeltä vastaanottimelle useaa eri reittiä pitkin. Kahden aseman välisen suoran yhteyden lisäksi signaali voi kulkea vastaanottajalle heijastuneena sekä taipuneena esimerkiksi seinistä tai muista esteistä. Ongelmaksi muodostuu heijastuneen signaalin saapuminen vastaanottajalle suoraa signaalia myöhemmin ja syynä tähän on yksinkertaisesti pitempi etenemismatka nopeuden pysyessä vakiona. [Has93], [Lin96]

2.2.1 Solupaikannus

Yksinkertaisin paikannusmenetelmä on solupaikannus (Cell of Origin, COO). Vastauksena paikannuspyyntöön aseman sijainniksi ilmoitetaan asemaa palvelevan tukiaseman sijainti. Mikäli verkon tukiasemat mahdollistavat palvelujaan käyttävien päätelaitteiden tunnistamisen, on solupaikannuksen toteuttaminen helppoa, sillä monimutkaisemmilta laskutoimituksilta vältytään. Kuvassa 2 päätelaite on paikannettu tukiaseman A alueelle, koska tämä tukiaseman palvelee kyseistä päätelaitetta paikannushetkellä.



Kuva 2: Solupaikannus

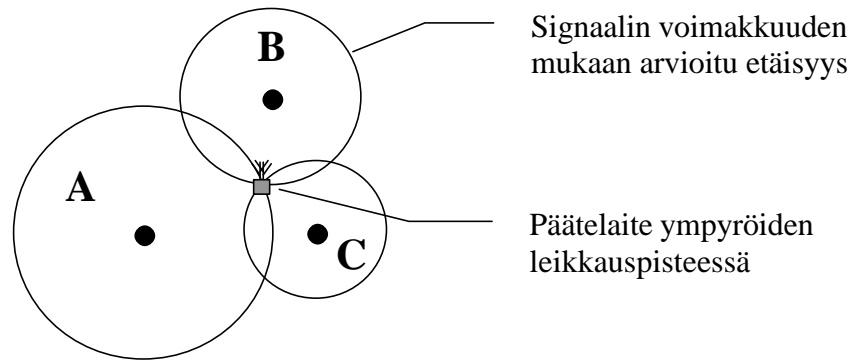
Haittapuolena solupaikannusmenetelmässä on heikko paikannustarkkuus, joka on verrannollinen tukiasemasolun kokoon ja voi täten vaihdella voimakkaasti. Esimerkiksi esteettömissä tiloissa, joissa tukiaseman lähettämät radiosignaalit voivat edetä vapaasti laajalle alueelle, voi solupaikannuksen tarkkuus olla riittämätön.

Solupaikannusmenetelmää WLAN-tekniikan päällä hyödyntää mm. Micsom OY:n paikannusjärjestelmä Micsom Zone Server [Mic02]. Verkon kuuluvuusalue voidaan jakaa pienempiin alueisiin, joista jokainen käsittää yhden tai useamman tukiaseman kuuluvuusalueen. Edelleen useammasta tukiasemasta koostuva alue voidaan jakaa sektoreihin yksittäisten tukiasemien kuuluvuusalueiden tarkkuudella siten, että pienin mahdollinen paikannusalue on yhden tukiaseman kuuluvuusalueen kokoinen.

2.2.2 Signaalin voimakkuus

Paikantaminen signaalin voimakkuuden (Rx-level) avulla perustuu mittauksiin tukiasemien ja päätelaitteen välillä. Mitatun signaalin voimakkuuden perusteella voidaan esittää arvio asemien välimatkasta. Mikäli mittaus voidaan suorittaa päätelaitteesta useampaan kuin yhteen tukiasemaan, paikannustarkkuus paranee. Kuvan 3 esittämällä tavalla kolmesta tukiasemasta mitattuna paikannustulos on teoriassa tarkka, mutta käytännössä tilanne on usein toisin. Mitattua signaalin voimakkuutta ei voida suoraan verrata asemien väliseen etäisyyteen, sillä signaalien kulkuun vaikuttavat esteet mittausalueella. Tästä johtuen tukiasemien kuuluvuusalueet eivät levittäydy tasaisesti keskipisteensä ympärille ja myös katvealueita voi syntyä kuuluvuusalueen sisälle.

Jotta signaalin voimakkuusmittauksia voitaisiin hyödyntää paikannuksessa paremmin, on verkon alueesta luotava etukäteen signaalikartta, jonka alueella suoritetaan useita signaalimittauksia ja tiedot jokaiselle pisteelle ominaisista signaaliarvoista tallennetaan tietokantaan. Päätelaitteen mittaamia signaaleja voidaan paikannustilanteessa verrata signaalikarttaan ja tällöin tulee huomioitua tukiasemien kuuluvuuden muutokset aluekohtaisesti.



Kuva 3: Paikannus signaalin voimakkuuden perusteella

Esimerkki signaalien mittaukseen perustuvan paikannusmenetelmän hyödyntämisestä WLAN-tekniikan yhteydessä on Ekahaun kehittämä paikannusmoottori, Ekahau Positioning Engine [Eka01]. Järjestelmä mahdollistaa mm. päätelaitteiden seurannan, tukiasemien kuuluvuusalueiden mittaamisen ja virhemarginaalien laskennan paikannustuloksen tarkkuuden arvioimiseksi. Paikannus onnistuu täysin WLAN-verkon avulla, mutta tarkkuuden parantamiseksi joudutaan tukiasemien määrää ehkä lisäämään varsinkin niillä alueilla, joilla signaaleja ei ole kuultavissa useasta tukiasemasta.

2.2.3 Signaalin saapumisaika

Signaalin saapumisaikaan (Time of Arrival, TOA) perustuvassa paikannusmenetelmässä hyödynnetään tietoa radioaaltojen etenemisnopeudesta. Menetelmässä mitataan signaalin siirrossa päätelaitteelta tukiasemalle kuluva aika. Radioaaltojen vakiona pysyvän nopeuden ja mitatun viiveen avulla lasketaan asemien välinen etäisyys. Näin tukiaseman ympärille muodostuu ympyrä, jonka säde on edellä laskettu etäisyys. Mittaus vähintään kolmen tukiaseman ja päätelaitteen välillä on välttämätöntä yksiselitteisen paikannustuloksen tuottamiseksi ympyröiden leikkauspisteestä.

Tukiasemien ja päätelaitteen asettaminen samaan aikaan on tässä menetelmässä tarkkuuden kannalta tärkeää. Radioaaltojen suuren etenemisnopeuden vuoksi

ajastustarkkuudessa puhutaan mikrosekuntia pienemmistä yksiköistä, sillä jo yhden mikrosekunnin aikana radioaalto etenee noin 300 metriä.

Asemien kellojen synkronoinnin vaikeuden takia signaalin saapumisaika –menetelmää ei ole käytetty paikannuksessa WLAN-verkoissa. Sen sijaan signaalin saapumisaikaerotus –menetelmän hyödyntämistä on tutkittu parempana vaihtoehtona. [Xin00]

2.2.4 Signaalin saapumisaikaerotus

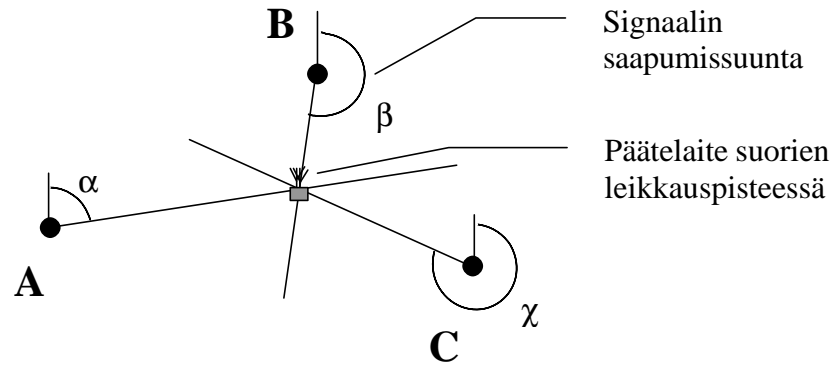
Signaalin saapumisaikaerotus -menetelmän (Time Difference of Arrival, TDOA) toimintaperiaate vastaa suurelta osin signaalin saapumisaika -menetelmän periaatetta. Poikkeavuutena saapumisaikaerotusta hyödynnettäessä on se, ettei tässä menetelmässä ole tarpeen synkronoida päätelaitteen kelloa. Aseman kuuluvuusalueella olevien tukiasemien kellojen synkronointi riittää, sillä päätelaite lähettää signaalin kaikille tukiasemille samanaikaisesti ja näin ollen päätelaitteen aikaa ei tarvitse tietää saapumisaikaerotusta laskettaessa. Tukiasemat voivat verrata signaalin vastaanottoaikoja keskenään ja päätelaitteen etäisyyden laskenta on mahdollista.

WLAN-tekniikan osalta signaalin saapumisaikaerotus –menetelmää ei ole käytetty kaupallisissa toteutuksissa, mutta tämänkin menetelmän hyödyntämistä on tutkittu mm. lähteessä [Xin00]. Tukiasemien synkronoinnin tarkkuusvaatimus asettaa haasteen tarkan paikannuksen toteuttamiseksi. Tämän menetelmän hyödyntämiseen palataan tarkemmin kappaleessa 4.3.

2.2.5 Signaalin saapumissuunta

Signaalin saapumissuunnan (Angle of Arrival, AOA) määrittämiseksi tarvitaan antenniryhmiä, joiden avulla voidaan havaita hyvin pienetkin muutokset signaalin edetessä antenniryhmän alueella. Laskemalla signaalin vaihe-erot antennien kesken saadaan määritettyä signaalin saapumissuunta. Toinen vaihtoehto suunnan

määrittämiseksi on suuntaavien antennien käyttö mittauksissa. Tällöin antennin keilaa käännetään elektronisesti parhaimman kuuluvuussuunnan löytämiseksi.



Kuva 4: Paikannus signaalin saapumissuunnan perusteella

Tarkan paikantamisen edellytyksenä on samanaikainen saapumissuunnan laskenta kahdesta tai useammasta antenniryhmästä tai suunta-antennista, joiden suuntajanas leikkaavat toisensa. (Kuva 4)

Signaalin saapumissuunnan määrittämiseen tarvittavat antenniryhmät tai suunta-antennit lisäävät verkon rakennuskustannuksia, eivätkä kuulu WLAN-verkon normaaliin varustukseen. Näin ollen standardilla WLAN-tekniikalla ei signaalin saapumissuunnan määrittäminen ole mahdollista. Lisäksi haittana on radiosignaalien monitie-eteneminen, joka tuottaa virhettä saapumissuunnan mittaamisessa. [Jam99]

3 IEEE 802.11 -STANDARDI

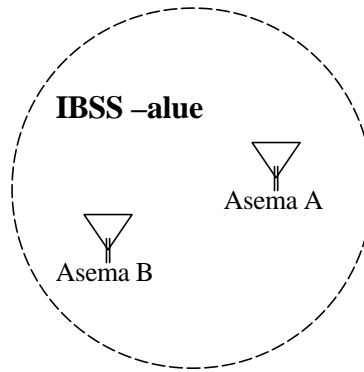
IEEE 802.11 -standardin mukainen verkko on matkapuhelinverkkojen tavoin radiosoluverkko, joiden yleisiä paikannusmenetelmiä on esitetty kappaleessa 2.2. Asemien paikantaminen ei ole IEEE 802.11 -standardin vakio-ominaisuus, vaan paikannuksen toteuttamiseksi on luotava erillinen järjestelmä standardin ominaisuuksia hyödyntäen. Tässä kappaleessa kuvataan IEEE 802.11 -verkon toimintaperiaate yleisesti sekä esitetään tarkemmin ne standardin ominaisuudet, joiden avulla tämän diplomityön esittelemä paikannusjärjestelmä on toteutettu.

3.1 Verkkotopologiat

IEEE 802.11 -standardin mukaisesti langaton verkko koostuu asemista, jotka pitävät sisällään MAC- (Medium Access Control) kerroksen, PHY- (Physical) kerroksen ja rajapinnan langattomalle siirtotielle. Asemien sijainti voi muuttua, mutta aseman komponenttien on mahdollistettava läpinäkyvä verkkoyhteys ylemmän kerroksen protokollille. Standardi määrittelee kaksi verkkotopologiaa: IBSS (Independent Basic Service Set) ja ESS (Extended Service Set).

3.1.1 IBSS

IBSS-verkko on itsenäinen vähintään kahden aseman muodostama BSS- (Basic Service Set) alue, jonka sisällä kaikilla asemilla on käytössään sama verkkonimi. IBSS-määrittelyn tarkoituksena on langattoman verkon yksinkertaistaminen tilanteissa, joissa tarvitaan väliaikaista verkkoyhteyttä kahden tai useamman aseman välille. Tällöin myös verkon alue on suppeampi kuin ESS-määrittelyssä, joka koostuu useammasta BSS-alueesta. Monissa yhteyksissä IBSS-verkosta käytetään nimitystä Ad-Hoc- tai Peer-to-Peer-verkko, mutta tällöin verkon toiminta saattaa osittain perustua laitteistovalmistajan omiin ratkaisuihin, jotka eivät kuulu standardin mukaiseen IBSS-määrittelyyn. Kuvan 5 asemille on asetettu sama verkkonimi ja asemat muodostavat yhdessä IBSS-verkon.



Kuva 5: IBSS-määrittelyn mukainen langaton verkko ja kaksi asemaa

3.1.2 ESS

ESS-määrittelyn tarkoituksena on yhdistää useita BSS-alueita yhteensulautuvaksi kokonaisuudeksi. ESS-verkossa tukiasemia voi olla useita ja näistä jokainen muodostaa oman BSS-alueen, joiden asiakkaina päätelaitteet ovat.

ESS-verkon tukiasemat yhdistetään jakeluverkolla. Jakeluverkon yhteydet voidaan toteuttaa tarkoitukseen parhaiten soveltuvalla tavalla. Esimerkkinä mainittakoon, että joidenkin valmistajien tukiasemissa on käytettävissä kaksi radorajapintaa, jolloin toinen näistä voidaan asettaa BSS-tilaan ja toista voidaan käyttää langattoman jakeluverkon luomiseksi. Samalla tavoin jakeluverkkona voidaan käyttää myös kaapeloitua verkkoa, esimerkiksi ethernetiä. Kuvassa 6 jakeluverkko yhdistää kaksi BSS-aluetta ESS-määrittelyn mukaiseksi verkoksi.



Kuva 6: ESS-määrittely

3.1.3 Asemien liikkuvuus

Edellä esitettyihin topologioihin liittyen standardi määrittelee asemien liikkuvuuden verkon alueella. Liikkuminen saman BSS:n alueella tai siirtyminen toisen BSS:n alueelle saman ESS:n sisällä ovat standardissa tuettuja ominaisuuksia. Sen sijaan siirryttäessä ESS-alueelta toiselle voi ongelmia ilmetä, sillä tällaisen siirtymän aiheuttaman tilanteen mutkatonta toimintaa ei standardissa taata.

Tilanteen korjaamiseksi laitteistovalmistajat Lucentin johdolla ovat kehittäneet oman IAPP- (Inter-Access Point Protocol) protokollan tätä tarkoitusta varten [Gei99]. Protokolla luo eri valmistajien tukiasemien välille toimivan menetelmän sijaintitietojen päivitykseen langattomien asemien liikuessa. Siirtoprotokollana tukiasemien välillä IAPP käyttää UDP- (User Datagram Protocol) ja IP- (Internet Protocol) protokollia [RFC768], [RFC791].

Protokollalla on kaksi tärkeää ominaisuutta. Sen avulla uudet tukiasemat voivat kertoa verkkoon liittymisestään ja tukiasemat saavat tiedon asiakkaiden siirtymisestä toisen tukiaseman asiakkaaksi. Jälkimmäisessä tapauksessa vanha tukiasema lähettää tukiasemaa vaihtaneelle asiakkaalle puskuroidut kehykset asiakkaan uudelle tukiasemalle. Uusi tukiasema päivittää MAC-tason siltaustaulut varmistaakseen toimivan siltauksen ja tämän jälkeen lähettää puskuroidut kehykset uudelle asiakkaalleen.

3.2 PHY

IEEE 802.11 –standardin mukaisen radioverkon laitteet toimivat 2,4 GHz:n taajuusalueella. Tämä taajuusalue on vapaasti käytettävissä maailmanlaajuisesti, joskin joidenkin alataajuuksien käyttöä on rajattu alueittain. Modulointitekniikkana on käytössä kaksi eri menetelmää: FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum, taajuushyppivä hajaspektritekniikka) ja DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum,

suorasekvenssihajautustekniikka). Radioverkon lisäksi fyysiselle kerrokselle on yhdeksi siirtotavaksi määritelty infrapunasihteily.

3.2.1 FHSS

FHSS menetelmä jakaa koko kaistan 79 kanavaan Pohjois-Amerikassa ja suuressa osassa Eurooppaa. Ranskassa, Espanjassa ja Japanissa on käytössä rajoitetummat kanavavalikoimat. Kanavat jaetaan standardin mukaan tiettyihin joukkoihin, joiden sisällä taajuushyppely tapahtuu. Kun tukiaseman kanavajoukko on määritelty näennäissatunnaisella menetelmällä, synkronoidaan asiakkaan taajuussekvenssi tukiaseman mukaan. Valittavana ovat 1 Mb/s tai 2 Mb/s siirtonopeudet.

3.2.2 DSSS

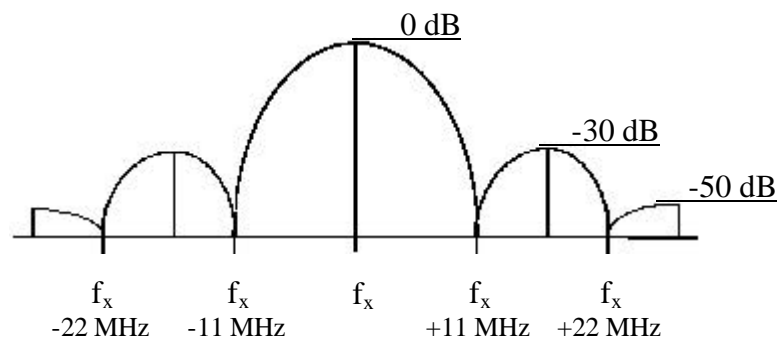
DSSS tekniikkaa käytettäessä kaista on jaettu 14 alataajuuteen, joiden käyttö on osittain rajattua kansallisista rajoituksista riippuen. Euroopassa useimmissa maissa käytössä ovat 13 ensimmäistä kanavaa, Pohjois-Amerikassa 11. Euroopassa poikkeuksen tekevät jälleen Ranska ja Espanja, joissa kanavien määrää on selvästi rajattu. Japanissa on käytössä vain kanava 14. Taulukossa 1 on esitetty käytettävissä olevat kanavat alueittain. ”X” merkitsee kanavan olevan käytettävissä sarakkeen ilmoittamalla alueella.

Kanavien 1-13 keskitaajuuksien väli on 5 MHz ja kanavien 13 ja 14 välillä eroa on 11 MHz. Viiden MHz:n ero keskitaajuudessa ei kuitenkaan ole riittävä estämään vierekkäisten kanavien vaikutusta toisiinsa, sillä yhden kanavan signaali leviää 22 MHz suuruiselle kaistalle. Tehon jakautuminen kaistalle noudattaa vaimennettua $\left| \frac{\sin(x)}{x} \right|$

funktiota. (Kuva 7)

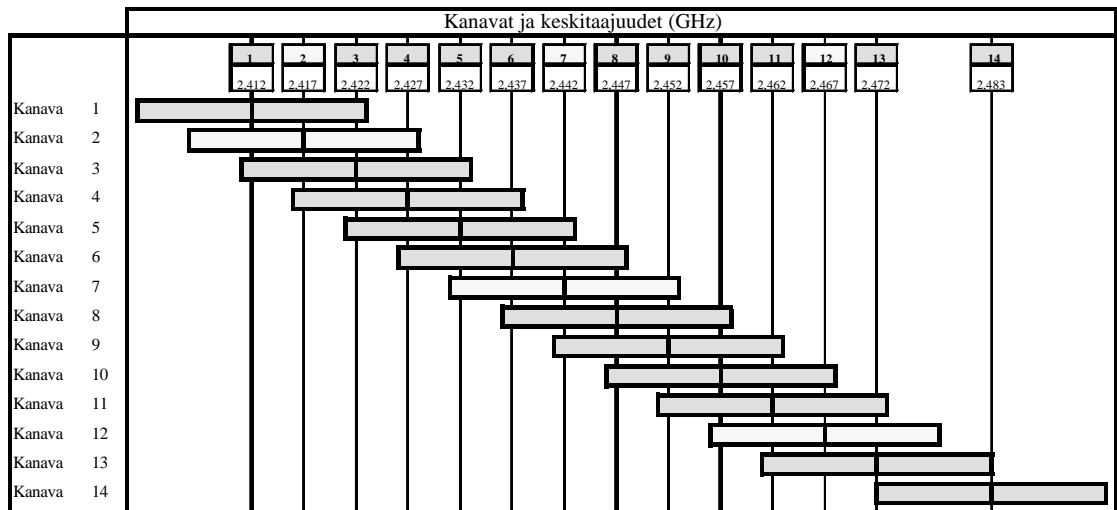
Taulukko 1: DSSS-modulaation käyttämät kanavat eri puolilla maailmaa

Kanavan numero	Taajuus GHz	Pohjois-Amerikka	Eurooppa	Espanja	Ranska	Japani
1	2,412	X	X			
2	2,417	X	X			
3	2,422	X	X			
4	2,427	X	X			
5	2,432	X	X			
6	2,437	X	X			
7	2,442	X	X			
8	2,447	X	X			
9	2,452	X	X			
10	2,457	X	X	X	X	
11	2,462	X	X	X	X	
12	2,467		X		X	
13	2,472		X		X	
14	2,483					X

**Kuva 7: Lähetystehon jakautuminen kanavalle**

Kuvan 7 esittämällä tavalla standardin mukaisen lähettimen lähetystehon tulee olla 30 dB vaimentunut suhteessa suurimpaan tehoon taajuusalueilla $f_x - 22$ MHz $< f < f_x - 11$ MHz ja $f_x - 11$ MHz $< f < f_x + 22$ MHz, kun f_x on kanavan keskitaajuus. Teho on siis vaimentunut yhteen tuhannesosaan huippuarvostaan. Taajuusalueilla $f < f_x - 22$ MHz ja $f > f_x + 22$ MHz vaimennuksen tulee olla vähintään 50 dB, joka vastaa vaimentumista yhteen sadastuhannesosaan [Ans99].

Kuvassa 8 on esitetty kanavien kaistanleveydet DSSS-tekniikkaa käytettäessä. Tummennetun alueen leveys on 22 MHz, jonka sisällä signaali on vaimentamaton. Esimerkiksi kanava 7 kuuluu vielä kanavien 3 ja 11 alueella, joten täysin häiriöttä ei näitä taajuuksia voida samanaikaisesti käyttää.



Kuva 8: Kanavien kaistanleveydet

Koska DSSS PHY:n kaistanleveys on 22 MHz, olisi samoja alueita kattavien tukiasemien taajuuksien välisen erotuksen suotavaa olla yli 22 MHz, mikäli lähetysten ei haluta millään tavoin vaikuttavan toisiinsa. Tällöin voidaan kanavataulukosta valita korkeintaan kolme sellaista kanavaa, jotka eivät kärsi toistensa vaikutuksesta. Euroopassa käytetyistä kanavista voitaisiin valita kanavat 1, 7 ja 13. Näin ollen kanavien välinen kaistanleveys olisi 30 MHz. [Oha99]

IEEE 802.11 standardin määrittelemä DSSS-tekniikka tarjoaa siirtonopeudeksi 1 tai 2 Mb/s. Sen sijaan tämän työn toteutusosassa käytetyt laitteet edustavat uudempaa standardia IEEE 802.11b, jonka merkittävin parannus vanhempaan versioon nähden on fyysisen kerroksen uudistaminen siten, että siirtonopeus kasvaa 11 Mb/s. Lisäksi 802.11b mahdollistaa siirtonopeuden pudottamisen kahteen tai yhteen Mb/s, ja tällöin 802.11b:n mukaiset laitteet ovat yhteensopivia 802.11-standardin laitteiden kanssa.

3.2.3 Infrapunatekniikka

Infrapunatekniikka on yksi kolmesta standardin määrittelemästä siirtotietekniikasta. Infrapunasäteilylle ominaiset rajoitteet estävät tekniikan hyödyntämisen pitkien välimatkojen yhdistämiseen. Myös vaatimus näköyhteyden säilyttämiseksi lähettimen ja vastaanottimen välillä rajoittaa käyttöä huomattavasti. Tiedonsiirtonopeutena infrapunatekniikka tarjoaa yhden tai kahden Mb/s nopeuden.

3.3 Radiotien ominaisuudet

Standardin määrittelemä tiedonsiirtonopeus tarkoittaa kahden aseman välillä siirrettävien bittien määrää sekunnissa eli bittinopeutta. Todellisen hyötykuorman osuus 1 Mb/s tiedonsiirtonopeudella voidaan laskea olevan noin 80 % bittinopeudesta, sillä osa tiedonsiirtokapasiteetista kuluu verkon hallinnan järjestelyyn ja mahdollisiin kehysten törmäyksiin. Tiedonsiirtonopeuden kasvaessa 11 Mb/s hyötykuorman suhteellinen osuus pienenee noin 50 % [Kam00]. WLAN-verkoissa hallintaan joudutaankin käyttämään enemmän resursseja kuin kaapeloiduissa lähiverkoissa. Tiedonsiirtokapasiteettia kuluu mm. seuraaviin toimintoihin:

- Kehysten otsaketiedot
- Kuittaukset
- Törmäysten estäminen
- Kehysten väliset tauot prioriteettien huomioimiseksi
- Beacon-merkkisignaali-kehukset ja niiden yhteyteen kuuluvat lähetystauot

3.3.1 Tehorajoitukset

Euroopassa ETSI (European Telecommunications Standards Institute) asettaa rajan lähetysteholle. Suurin sallittu teho on 100 mW. Vertailukohtana mainittakoon USA:ssa

käytössä oleva FCC:n (Federal Communications Commission) asettama yhden watin rajoitus lähetystehossa. Lähetystehon rajaaminen vaikuttaa kantomatkoihin oleellisesti. Ilman erillistä antennia 100 mW:n teholla lähettävien langattomien verkkokorttien kuuluvuus on esteettömässä tilassa muutamia satoja metrejä ja tyypillisessä toimistorakennuksessa muutamia kymmeniä metrejä.

Yleensä WLAN-laitteiston yhteydessä puhutaan lähetys- ja vastaanottotehoista käyttäen yksikköä desibelimilliwatti, dBm. Tällöin tehoa verrataan yhden milliwatin tehoon logaritmisella asteikolla. Lähetysteho voi enimmillään olla 100 mW eli 20 dBm ja vastaanotettaessa teho on heikoimmillaan pudonnut lähelle tasoa -90 dBm, joka on milliwateissa 10^{-9} mW.

3.3.2 Etenemisvaimennus

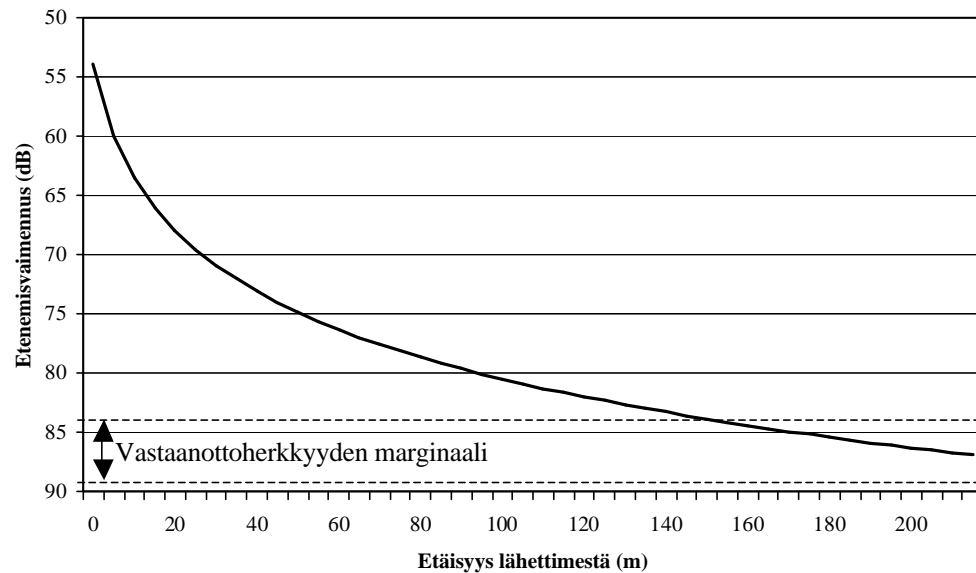
Radioaaltojen teho vapaassa tilassa heikkenee suhteessa etäisyyden neliöön. Teoreettinen etenemisvaimennus lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$Etenemisvaimennus(dB) = \log_{10} \left(\frac{4Pd}{I} \right)^2, \quad (1)$$

missä d = etäisyys lähettimestä
 I = aallonpituus

Kuvassa 9 on esitetty kaavan 1 mukaan laskettu etenemisvaimennus etäisyyden suhteen. Laskennassa signaalin taajuutena on käytetty tasan 2,4 Ghz. Vaimennuksen kasvaessa yli 80 dB:n varsinainen signaali sekoittuu pahasti taustakohinaan ja bittivirheiden määrä kasvaa voimakkaasti. Vastaanottimen tekniset rajoitukset tulevat tällöin vastaan eikä herkkyys riitä erottelemaan signaalia kohinasta. Vastaanottoherkkyyteen voidaan kuitenkin vaikuttaa laskemalla tiedonsiirtonopeutta, joka on säädettävissä IEEE 802.11b -standardin mukaisissa laitteissa. Esimerkkinä mainittakoon Lucentin valmistaman PCMCIA-väyläisen WLAN-kortin vastaanottoherkkyyden kasvavan -83 dBm:sta -94

dBm:iin tiedonsiirtonopeuden laskiessa 11 Mb/s:sta 1 Mb/s. Teoriassa edellä mainittu herkkyuden kasvaminen pidentää kuuluvuusalueen sädettä noin 3,5 kertaiseksi. Käytännössä vaikutus on yleensä huomattavasti pienempi.



Kuva 9: Etenemisvaimennus etäisyyden funktiona

Käytännössä etenemisvaimennuksen lisäksi on huomioitava esteiden heikentävä vaikutus radioaaltoihin. Esimerkiksi ohuet puulevyiset seinät voivat heikentää signaalia noin kuusi desibeliä. Voimakkaampi vaikutus on paksuilla betoniseinillä ja pahiten radioaaltoja heikentävät metalliset rakenteet, esimerkiksi teräsvahvisteinen betoni ja hissikulut [Gei99] [Oha99]. Vielä kehitysvaiheessa olevan IEEE 802.11a -standardin radiokaistan taajuus tulee olemaan 5 GHz. Tällä taajuudella etenemisvaimennus on 5–10 dB suurempi kuin 2,4 GHz taajuudella, joten myös tukiasematiheyden on oltava suurempi.

3.3.3 Monitie-eteneminen

Monitie-etenemisen seurauksena radiovastaanotin vastaanottaa saman signaalin monesta eri suunnasta ja tällöin signaalien välille on muodostunut aikaero. Vastaanottajalle eri aikaan saapuvat signaalit pidentävät siirrettävän symbolin kestoja ja näin symbolit voivat sekoittua keskenään, mikäli niiden välinen aika on liian lyhyt erottelun onnistumiseksi. Symbolien välisen ajan pidentäminen lähettimessä ei ole ongelmaan toimiva ratkaisu, mikäli tiedonsiirtonopeudesta ei haluta tinkiä. [Bul93]

Symbolien sekoittumisen lisäksi toinen ongelma on kahden eri vaiheessa etenevän signaalin toisiaan heikentävä vaikutus. Kun signaalien vaihe-ero on 180° , ovat signaalit vastakkaisvaiheisia. Keskinäinen vaimennus on tällöin suurin ja teoriassa yhtä voimakkaat signaalit kumoavat toisensa kokonaan. 2,4 GHz:n taajuudella radiosignaalin aallonpituus on noin 12 cm, joten pienikin lähettimen tai vastaanottimen siirtyminen voi vaimentaa vastaanotettavaa signaalia jopa 20 dB.

3.3.4 Häiriötekijät

WLAN:n käyttämän 2,4 GHz taajuusalueen ollessa vapaasti kaikkien käytettävissä häiriöiden esiintyminen on todennäköistä. Muiden organisaatioiden hallitsemien WLAN-verkkojen häiriöiden lisäksi samaa taajuusaluetta käyttävät Bluetooth-standardin laitteet ja mikroaaltouunit voivat aiheuttaa arvaamattomia häiriöitä.

WLAN:n ja Bluetooth-tekniikan toimivuutta yhteisellä alueella on tutkittu lähteessä [Lan01] ja tulosten mukaan Bluetoothin vaikutus WLAN:n tiedonsiirtonopeuteen on merkittävä. Esimerkiksi kun WLAN-asemien etäisyys toisistaan kasvoi yli viiteen metriin, oli Bluetooth-lähettimen tiedonsiirtonopeutta laskeva vaikutus yli 25%. Bluetooth-lähettimen etäisyys WLAN-laitteesta oli testin aikana yksi metri. WLAN-laitteiden välimatkan kasvaminen ja ohuiden toimistoseiniä väliintulo kasvatti Bluetoothin vaikutusta entisestään. Jo 30 metrin etäisyys ja kolmen seinän vaikutus

yhdessä Bluetoothin häiriön kanssa laskivat tiedonsiirtonopeutta yli 60% tasosta, joka saavutettiin ilman Bluetoothin aiheuttamaa häiriötä [Lan01].

3.4 MAC-kerros

MAC-kerros sijaitsee protokollapinossa fyysisen kerroksen (PHY) yläpuolella. Kerroksen tehtävänä on huolehtia päätelaitteiden pääsystä langattomalle siirtotielle, niiden virheettömästä tiedonsiirrosta sekä verkon tietoturvasta.

Pääsy langattomalle siirtotielle voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla. Ensimmäinen vaihtoehto on kilpavaraukseen perustuva menetelmä, CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance), joka on hyvin samanlainen IEEE 802.3 standardin CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection) menetelmän kanssa. Koska siirtotien käytön järjestelyistä vastaavat kaikki verkon asemat, käytetään menetelmästä myös nimeä Distributed Coordination Function, DCF. Toinen vaihtoehto on kilpavaraukseton prioriteettiin perustuva menetelmä (PCF, Point Coordination Function), jossa tukiasemat jakavat lähetysvuorot asiakkaille.

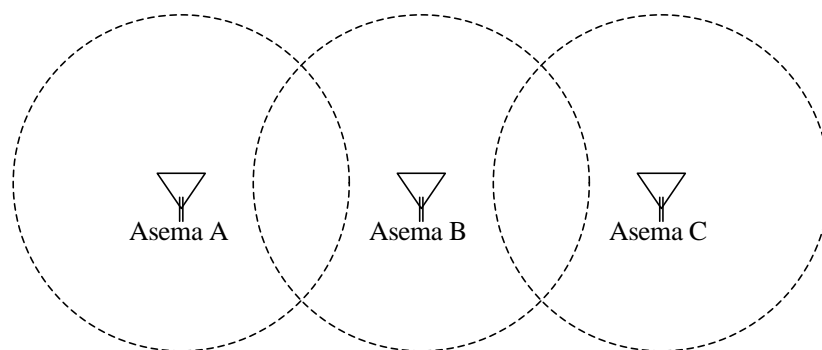
3.4.1 CSMA/CA

Kilpavaraus on ensisijainen saantimenetelmä langatonta siirtotietä käytettäessä. MAC-kerros selvittää siirtotien tilan fyysisen kerroksen tietojen ja MAC-kerroksen pakettien sisällön pohjalta. Fyysinen kerros tarkkailee siirtotien tilaa ja välittää tiedon varaustilanteesta MAC-kerrokselle. Fyysiseltä kerrokselta saadun tilannetiedon lisäksi MAC-kerroksella on oma kirjanpito ns. siirtotien tilasta. MAC-kerroksella pakettien sisältöön kuuluu tietokenttä ”Duration”, jota käytetään kertomaan, kuinka pitkäksi ajaksi paketin lähettänyt asema varaa siirtotien käyttöönsä. MAC-kerros tallentaa kentän tiedon NAV:iin (Network Allocation Vector) aina, kun uusi paketti havaitaan liikkuvan siirtotiellä. NAV-laskurin nollauduttua asema voi jälleen pyrkiä varaamaan siirtotien omaan käyttöönsä.

Vaikka edellä esitettyjen ehtojen mukaan siirtotie olisi vapaa, on silti mahdollista, että törmäyksiä syntyy. Näihin tilanteisiin CSMA/CA varautuu ottamalla käyttöön laskurin, jonka aikana asema ei lähetä mitään. Laskurin arvo saadaan kertomalla satunnaisluvulla aikavälin pituus, joka luetaan aseman verkonhallintakannasta (MIB, Management Information Base). Käyttämällä satunnaisen pituista taukoa lähetyksen estämiseksi vältetään usean aseman samanaikainen lähetysoyryitys juuri sillä hetkellä, kun siirtotie vapautuu. Useat siirtotien vapautumista odottaneet asemat eivät näin ollen yritä lähettää välittömästi siirtotien vapauduttua, vaan odottavat satunnaisen ajan, kunnes aseman oma laskuri on nolautunut. Siirtotien käyttöaste vaikuttaa edellä mainitun satunnaisluvun maksimiarvoon. Jos käyttöaste on matala, satunnaisluku valitaan pienemmästä joukosta kuin korkean käyttöasteen aikana.

3.4.2 Ongelma siirtotien varauksessa

Langattomassa verkossa ei voida luottaa kehysten perille menemiseen samalla tavoin kuin kaapeloidussa verkossa. Eräs kaapeliverkoissa esiintymätön ja WLAN:ssa yleisesti tunnettu ongelma on toisiltaan piilossa olevat asemat. Esimerkkitalanne on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10: "Piilossa olevien asemien" –ongelma

Kuvassa asemat A ja C eivät kuule toisiaan ja täten voivat sattumalta lähettää kehyksiä asemalle B samanaikaisesti. Tästä seuraa siirrettävän tiedon sekoittuminen ja tieto on täten käyttökelvotonta, sillä asema B ei voi erotella kahdesta lähteestä samanaikaisesti lähetettyä tietoa toisistaan.

Ongelman ratkaisuksi standardissa esitetään RTS- (Request To Send) ja CTS- (Clear To Send) ohjauskehyksiä, joiden toteuttaminen asemassa ei ole pakollista, vaan tämän menetelmän mahdollistaminen on laitevalmistajien päätettävissä. Menetelmää voidaan käyttää CSMA/CA:n tukena estämään kehysten päällekkäisiä lähetyksiä. RTS-kehyksellä asema voi tarvittaessa pyytää lähetysoikeutta kohdeasemalta. Mikäli radiotie on vapaa kohdeasema vastaa pyyntöön CTS-kehyksellä. Vastauksen saatuaan lähetysoikeuden saanut asema lähettää hyötykuorman kohdeasemalle. Muut verkon asemat, jotka vastaanottivat RTS- tai CTS-kehysten osaavat varautua alkavaan tiedonsiirtoon, eivätkä lähetä päällekkäisiä kehyksiä käynnissä olevan tiedonsiirron aikana. Sama käytäntö toistuu, kun edellinen tiedonsiirto on päättynyt. [Khu98]

3.4.3 Kehysten uudelleenlähetys

Kehyksiin voi syntyä virheitä heikon signaalin, siihen vaikuttavien ulkoisten häiriötekijöiden tai kehysten törmäysten vuoksi. Virheen korjauksesta on vastuussa kehysten lähetyksen aloittanut osapuoli. Useimmiten virheen korjaus tarkoittaa kehysten uudelleen lähettämistä tietyn ajan kuluttua, mikäli vastaanottaja ei ole vastannut lähetykseen. Menetelmän nimi on ARQ (Automatic Repeat-request).

Verkkohallintakannassa on määritelty pituus, joka jakaa kehykset lyhyisiin ja pitkiin kehyksiin. Lisäksi kannassa on raja-arvot uudelleenlähetyksille sekä lyhyille että pitkille kehyksille. Uudelleenlähetyksen määrä riippuu siitä, kuuluuko kehys edellä määritellyn rajan mukaisesti pitkiin vai lyhyisiin kehyksiin ja lisäksi siitä, mikä on määritelty kyseisen kehystyyppin uudelleenlähetysmääräksi.

Kehyksille on määritelty neljä eri prioriteettia, joiden mukaan erityyppiset kehykset odottavat tietyn ajan edellisen kehysten lähetyksen jälkeen ennen kuin uuden kehysten

lähetyksen aloitetaan. Lyhyin odotusaika (SIFS, Shortest Interframe Space) ja samalla korkein prioriteetti on kuittaus- ja CTS-kehyksillä sekä ensimmäistä seuraavilla samaan joukkoon kuuluvilla kehyksillä. Näiden kehysten korkea prioriteetti vähentää tarvetta kehysten uudelleenlähetykseen. Toiseksi pisin odotusaika on määritelty kaikille niille kehyksille, jotka lähetetään kilpavarauksettomalla menetelmällä. Kolmas joukko on kilpavarausta käyttävien asemien kehykset. Neljättä ja pisintä odotusaikaa käytetään tiettyjen virhetilanteiden yhteydessä, jolloin lisäaika mahdollistaa virheistä toipumisen.

3.4.4 Kilpavaraukseton siirtotien hyödyntäminen

Toimintamalli kilpavarauksettomaan siirtotien hyödyntämiseen on esitetty standardissa, mutta menetelmän tukeminen on asemien osalta vapaavalintaista ja näin ollen jälleen laitteistovalmistajien päätettävissä. Menetelmässä asiakkaat eivät voi käyttää siirtotietä, ellei niille ole annettu tähän lupaa lähetyksestä koordinoivan aseman toimesta. Yleensä koordinoivana asemana toimii tukiasema. Odotusaika kehysten välillä on lyhyempi kuin kilpavarausta käyttävillä asemilla, joten koordinaattori varaa kaistan itselleen joutumatta kilpailemaan muiden asemien kanssa.

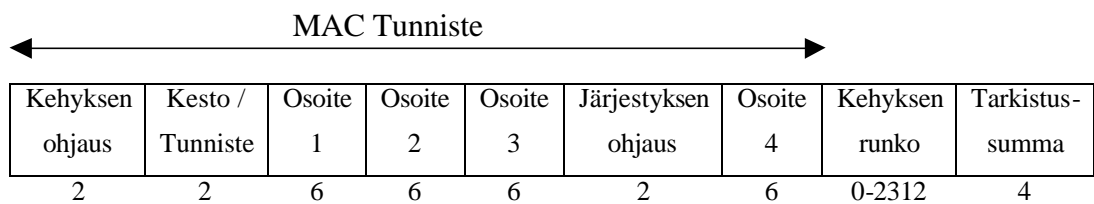
Odotusajan jälkeen koordinoiva tukiasema lähettää merkkisignaalin, jossa se kertoo asiakkaille, kuinka kauan kilpavaraukseton jakso kestää ja tämän jakson aikana asiakkaiden on lykättävä lähetyksensä. Merkkisignaalin lähetyksen jälkeen tukiasema voi:

- Lähettää datakehyksiä jollekin tietylle asiakkaalle tai asiakasryhmälle.
- Oikeuttaa tietyn aseman suorittamaan lähetyksen toiselle asemalle. Vaikka lähettävä asema ei saisi vastaanottajalta kuittausa, ei uutta lähetyksestä silti saa suorittaa ilman uutta oikeutusta tukiasemalta.
- Lähettää dataa ja antaa asiakkaalle lähetysoikeuden samassa kehyksessä vähentääkseen verkkoresurssien käyttöä.
- Keskeyttää kilpavarauksettoman siirtotien käytön. Tämä vaihtoehto tulee kyseeseen silloin, kun ennalta määritelty aika on kulunut umpeen, tai kun tukiasemalla ei ole enää lähetettävää asiakkaille eikä verkossa ole asiakkaita, joille lähetysoikeus voitaisiin luovuttaa.

Asemat voivat ilmoittautua tukiasemalle verkkoon liittyessään, mikäli ne haluavat päästä tukiaseman kiertokyselylistalle. Vain listalla oleville asemille annetaan vuorollaan oikeus käyttää siirtotietä. Asemat voivat muuttaa tilaansa liittymällä verkkoon uudelleen.

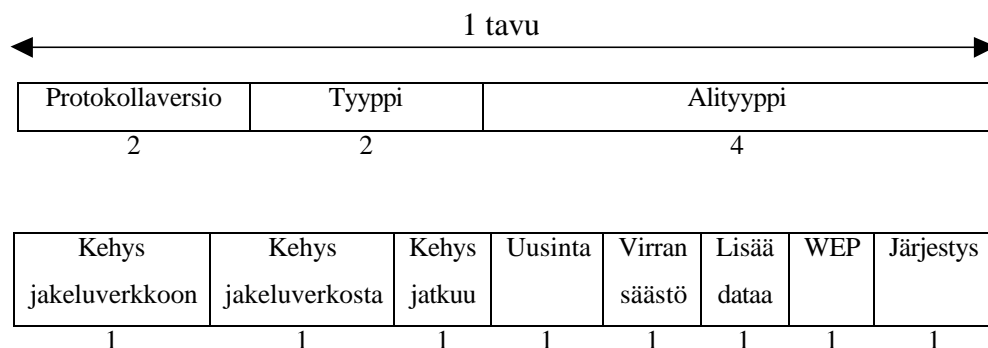
3.4.5 MAC-kehyksen muoto

Yleinen MAC-kerroksen kehyksen muoto sisältää MAC-tunnisteen (MAC Header), kehyksen runko-osan, jossa hyötykuorma siirretään sekä kehyksen tarkistussumman. Kehyksen ulkoasu on esitetty kuvassa 11, jossa näkyy myös MAC-tunnisteen sisältö erillisten kenttien tarkkuudella. Kenttien alla näkyy pituus, jonka yksikkönä on 8-bittinen tavu.



Kuva 11: IEEE 802.11 -kehyksen muoto

Kehyksen ensimmäinen osa, ”kehyksen ohjaus” -kenttä, koostuu alikentistä, jotka on esitetty kuvassa 12. Kuvassa yksikkönä on bitti.



Kuva 12: Kehyksen ohjaus -kenttä

”Kehyksen ohjaus” -kentän ensimmäinen alikenttä, protokollaversio, määrittelee käytettävän IEEE 802.11 -standardin MAC-protokollan version. Alikentän arvon mukaan vastaanottaja päättää, osaako se tulkita kehyksen oikein. Tällä hetkellä ainoa käytössä oleva arvo on nolla ja muut arvot on varattu myöhempää käyttöä varten.

Tyyppi- ja alityyppi-alikentät määrittelevät kehyksen tehtävän tyyppin mukaan ja tästä myös päätellään, mitä muita kenttiä kehyksessä käytetään. Osa kentistä on käytössä vain tietyissä kenttätyypeissä. Kehystyyppejä on kolme: ohjaus-, data- ja hallintakehystyyppit. Lisäksi jokaiselle tyyppille on useita alityyppejä, joita tässä yhteydessä ei ole tarkoituksen mukaista käydä kokonaan läpi. Karkealla tasolla lueteltuna eri kehystyyppit sisältävät seuraavia alityyppejä.

- Ohjaustyyppi: Virransäästö, RTS/CTS, ACK (Acknowledgement) ja tukiaseman suorittaman kaistanvarauksen (käytetään PCF-tilassa) ohjaukseen tarvittavat tyypit
- Datatyyppi: Tiedonsiirtoon liittyvät kehykset. PCF-tilan vaatimat luotaukset ja ACK-kehykset voidaan liittää datakehykseen, jolloin saadaan aikaiseksi erilaisia kombinaatioita datatyyppin kehyksille.
- Hallintatyyppi: Aseman liittyminen verkkoon samoin kuin hallittu irtautuminen, luotauskehykset, aseman autenttisuuden varmentaminen ja beacon-merkkisignaalikehys, jonka avulla tukiasemat ilmoittavat olemassaolostaan muille asemille ja näin ollen asemat osaavat liittyä verkkoon signaalin lähettäneen tukiaseman välityksellä. Beacon-merkkisignaalia käytetään hyväksi myös tämän diplomityön loppuosassa esiteltävässä paikannusmenetelmässä, jossa langaton asema mittaa signaalitasoja lähellä sijaitsevista tukiasemista.

Kaikki seuraavat ”kehyksen ohjaus” -kentän alikentät ovat yhden bitin pituisia ja niiden käyttöperiaate on vipumainen eli käytettävissä kaksi tilaa, jotka määräävät, onko ominaisuus käytössä vai ei.

”Kehys jakeluverkkoon” ja ”Kehys jakeluverkosta” -kenttien sisällöt muuttuvat sen mukaan, onko kehyksen lähettäjänä ja vastaanottajana tukiasema vai langaton asema. Tukiasemasta langattomille asemille lähetetyissä kehyksissä ensimmäisen kentän arvo on nolla tai toisen kentän arvo on yksi. Tilanne on käänteinen, kun kehys lähetetään langattomasta asemasta tukiasemalle. Langattomien asemien välisessä liikenteessä kummankin kentän arvona on nolla. Vastaavasti tukiasemien välisessä liikenteessä kenttien arvot ovat ykkösiä. Tämä tilanne on mahdollinen käytettäessä tukiasemien välillä langatonta jakeluverkkoa.

”Kehys jatkuu” -kentällä voidaan kertoa vastaanottajalle, onko osiin jaetusta kehyksestä tämän osan lähetyksen jälkeen vielä osia lähettämättä. Kentän arvo on nolla, kun ositetun kehyksen viimeinen osa lähetetään.

”Uusinta” -kenttä ilmoittaa, onko kyseessä kehyksen uudelleenlähetyks. Kenttää käytetään data- ja hallintakehysten yhteydessä. Arvon ollessa nolla, kehys lähetetään ensimmäistä kertaa. Arvo yksi ilmoittaa kehyksen olevan uudelleenlähetyks.

”Virran säästö” -kenttää käyttämällä langaton asema ilmoittaa virransäästötilan käyttöönotosta. Arvolla yksi asema kertoo, että käynnissä olevan lähetyksen päätteeksi se vaihtaa normaalitilasta virransäästötilaan, eikä normaali kommunikaatio tällöin ole mahdollista. Arvo nolla merkitsee normaalitilan käytön jatkumista lähetyksen loputtuakin.

”Lisää dataa” -kenttää käyttämällä tukiasema voi ilmoittaa langattomalle asemalla, että tukiaseman muistissa on ainakin yksi kehys odottamassa siirtoa samalle asemalle. Myös langaton asema voi asettaa kentän arvoksi yksi silloin, kun siirtokaistan jako tapahtuu kilpavarauksettomasti ja asemalla on lisää dataa lähetettävänä tukiasemalle.

”WEP” (Wired Equivalent Privacy) -kentän arvo yksi kertoo, että kehyksen runko-osa on salattu WEP-algoritmeilla. Kentän arvo voi olla yksi vain datakehyksissä ja hallintakehyksissä, joiden alityyppi on ”autentikointi”.

”Järjestys” -kentän arvolla yksi voidaan merkitä kehyksen kuuluvan sellaiselle palvelulle, jolle kehysten oikea järjestys on erittäin tärkeää. Tämä puolestaan vaikuttaa kehysten siirtoon tukiasemissa ja jakeluverkossa.

”Kehyksen ohjaus” -kenttä IEEE 802.11 -kehyksessä seuraa ”Kesto/Tunniste” -kenttä. Kentällä on nimensä mukaisesti kaksi eri tarkoitusta riippuen siitä, minkä tyyppisestä kehyksestä on kysymys. Tunnisteena kenttää käytetään vain virransäästötilan yhteydessä, kun asema hakee tukiasemalta siellä tallessa olleet kehykset itselleen. Tunnistetiedon sisältävän kentän kaksi merkitsevintä bittiä ovat aina ykkösiä.

Kun kentän merkitsevin bitti on nolla, bitit 14–0 kertovat meneillään olevan kehysten vaihdon odotetun keston. Asemat päivittävät tämän arvon perusteella NAV-kenttensä ja täten pidättäytyvät häiritsemästä käynnissä olevaa lähetystä.

Kehykseen sisältyvien osoitekenttien lukumäärä riippuu kehyksen tyyppistä. Erilaisia kenttiä standardissa on määritelty viisi kappaletta. BSS-alueen tunniste (BSSID) jakeluverkon välityksellä yhdistetyissä tukiasemissa on kyseisen BSS-alueen tukiaseman MAC-osoite. IBSS-verkossa BSSID-osoite muodostetaan satunnaisluvusta, jolloin hyvin suurella todennäköisyydellä BSSID on erilainen jokaisessa verkossa. Lähettimen osoite on kehyksen radiotielle lähettäneen aseman MAC-osoite. Osoitteen mukaan normaaliin kehysten välitykseen kuuluvat vastaukset lähetetään välityksen aloittaneelle asemalle. Vastaanottajan osoite on vastaavasti kehyksen vastaanottavan aseman MAC-osoite. Tämä osoite voi olla myös ryhmäosoite, mikäli lähetys on tarkoitettu vastaanotettavaksi useassa asemassa. Lähdeosoite on paketin lähettäneen laitteen MAC-osoite. Verkoissa, joissa tukiasemat ovat yhteydessä toisiinsa jakeluverkon kautta, lähdeosoite voi erota lähettimen osoitteesta, mikäli kehys on lähetetty toiselta BSS-alueelta. Ylemmän tason protokollien tulisi käyttää lähdeosoitetta käsitellessään vastaanotettua dataa. Kohdeosoite on vastaavasti lopullisen kohdelaitteen MAC-osoite. Kohdeosoite ei kaikissa tapauksissa ole sama kuin vastaanottajan osoite ja se voi myös olla ryhmäosoite.

”Järjestyksen ohjaus” -kenttä koostuu kahdesta alikentästä, joista ensimmäinen pitää sisällään kehyksen järjestysnumeron ja toinen osiin jaetun kehyksen osan järjestysnumeron. Kehyksessä, joka on jaettu osiin, jokainen osa saa saman arvon ensimmäiseen alikenttään. Ensimmäinen jaetun kehyksen osa tai koko jakamaton kehys saa toisen alikentän arvoksi nollan.

Kehyksen runko sisältää varsinaisen hyötykuorman, joka voi olla sovelluksen lähettämää dataa tai standardin mukaista hallintainformaatiota. Kentän koko ilman WEP-salausta on enimmillään 2304 tavua tai salauksen kanssa 2312 tavua. Kentän koko on mitoitettu siten, että sovelluksen lähettämän paketin koko voi olla 2048 tavua ja tämän kapselointiin voidaan vielä käyttää 256 tavua, jotta ylemmän tason protokollien tunniste- ja otsaketiedot mahtuvat kehykseen.

Viimeinen kenttä yleisessä kehysmallissa on tarkistussumma. Summan laskentaan käytetään CCITT (Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique) CRC-32- (Cyclic Redundancy Check) polynomia, joka on käytössä myös muissa IEEE 802 -lähiverkkostandardeissa.

IEEE 802.11 -standardi sisältää määritelmät jokaiselle kehystyyppille lukuisissa eri tilanteissa, mutta niiden tarkempi esittäminen tässä työssä ei ole tarpeen. Yleisen kehysmallin lisäksi otetaan kuitenkin lähempään tarkasteluun yksi hallintakehyksien alityypeistä, beacon-kehys.

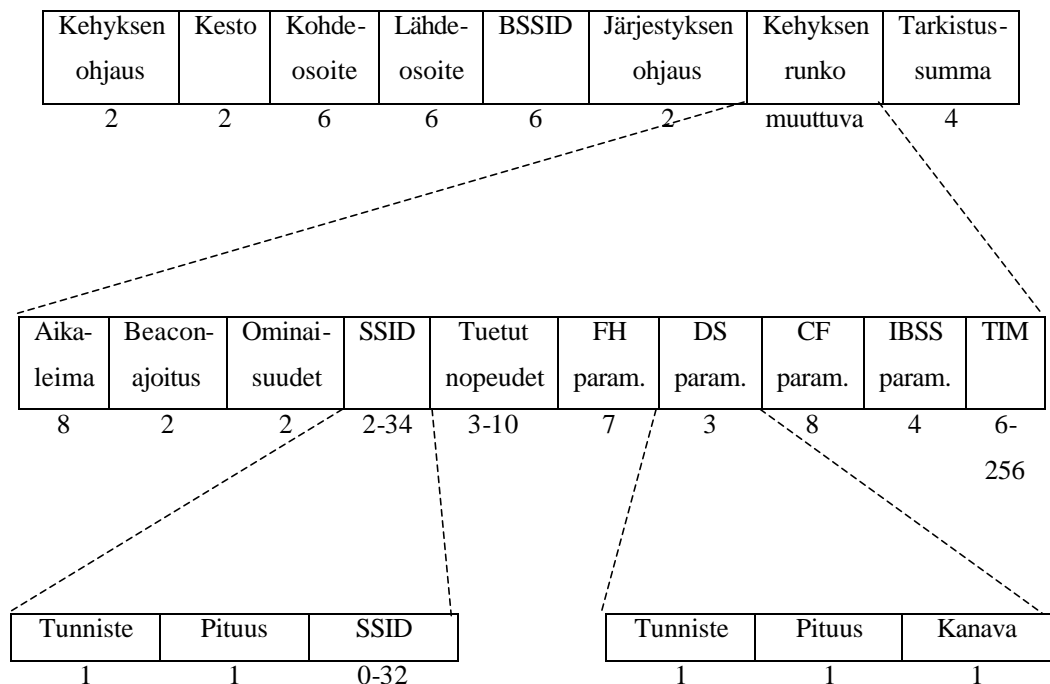
Osalla kehyksen rungon tietoelementeistä on tietty vakiopituus, kun taas jotkin elementit sisältävät pituuden määrittelevän kentän, jonka mukaan elementin sisältöä luetaan. Pituuden ilmoittaminen elementin alussa helpottaa uusien kenttien käyttöönottamista jatkossa, sillä vanhempia elementtejä ymmärtävät toteutukset voivat hypätä uudempien elementtien ylitse tietäessään elementtien pituuden.

Beacon-kehysten runko pitää sisällään seuraavanlaista tietoa.

- Aikaleima: Sisältää aseman sisäisen ajastimen arvon sillä hetkellä, jolloin kehys lähetetään.
- Beacon-ajoitus: Merkkisignaalin välisen aikajakson pituus.
- Ominaisuudet: Elementti luettelee yhden bitin mittaisissa kentissä, mitkä standardin ominaisuudet verkossa ovat käytössä ja mitkä eivät. Ominaisuudet liittyvät kilpavarauksettoman liikennöinnin kontrollointiin, salauksen käyttöön sekä IEEE 802.11b -standardin mukanaan tuomien vanhemmasta standardista poikkeavien lyhyiden kehysotsakkeiden hyödyntämiseen kyseisessä verkossa.
- SSID (Service Set Identifier): Verkkonimi, joka on kaikilla asemilla yhteinen samalla BSS-alueella.
- Tuetut nopeudet: Listaus aseman tukemista tiedonsiirtonopeuksista.
- FH- (Frequency Hopping) parametrit: Elementti esiintyy vain verkoissa, joiden radiotiellä on käytössä taajuushyppelytekniikka (FHSS). Sisältää parametrit taajuushyppelysekvenssin synkronointiin.
- DS- (Direct Sequence) parametrit: Elementti esiintyy vain verkoissa, joiden radiotiellä on käytössä suorasekvenssitekniikka (DSSS). Ainoa tietokenttä sisältää käytetyn radioverkon kanavanumeron.
- CF- (Contention Free) parametrit: Elementti esiintyy vain kilpavarauksettomissa verkoissa, joissa tukiasema jakaa lähetysvuorot muille asemille. Parametrit kertovat lähetysvuoron pituuden, jäljellä olevan ajan ja muita kilpavarauksettoman verkon ohjaamiseen tarvittavia tietoja.

- IBSS-parametrit: Elementti esiintyy vain IBSS-verkoissa. Sisältönä lähetetään pituus aikavälille, jonka sisällä asemat voivat lähettää ilmoituksia tarpeestaan kommunikoida yhden tai useamman aseman kanssa.
- TIM (Traffic Indication Map): Elementti esiintyy vain tukiasemien luomissa kehyksissä. Elementin tarkoituksena on ilmoittaa virransäästötilassa oleville asemille, että tukiaseman muistissa on kehyksiä odottamassa siirtoa. Näin ollen asemat osaavat varautua tulevaan siirtoon eivätkä ole siirron alkaessa virransäästötilassa.

Kuvassa 13 esitetään beacon-kehyyksen rakenne tarkentamalla tutkiskelua aina yksittäisiin tietoelementteihin asti. Karkeimmalla tasolla kuvan kehys muistuttaa melko läheisesti edellä esitettyä yleistä kehysmallia, mutta tarkempi kuvaus kehyksen runkosasta paljastaa uuden kenttärakenteen.



Kuva 13: Beacon-kehyyksen rakenne

4 PAIKANNUS WLAN-VERKOSSA

IEEE 802.11 standardin mukaisiin laitteisiin perustuvia paikannusmenetelmiä on tutkittu useissa projekteissa ja tulokset ovat olleet lupaavia [Bah00a], [Bah00b], [Ikk01], [Lat99], [Sma00]. Kalle Ikkelän diplomityössään [Ikk01] toteuttaman pilottisovelluksen saavuttamat hyvät tulokset solupaikannuksen osalta sekä Microsoftin tutkimusryhmän monimutkaisemmat, muutaman metrin keskimääräiseen paikannustarkkuuteen pystyvät algoritmit kertovat tekniikan soveltuvan monenlaisiin paikannustarpeisiin. Tekniikka mahdollistaa paikannuksen sisätiloissa melko hyvällä tarkkuudella verrattuna GPS-satelliittipaikannukseen tai GSM- (Global System for Mobile communication) verkon tarjoamaan paikannukseen. Sisätilapaikannuksen osalta WLAN-laitteet parantavat paikannuksen tarkkuutta, sillä muilla menetelmillä seinien läpäisystä johtuvat radiosignaalien vääristyminen ja heikkeneminen vaikuttavat tulokseen. Koska WLAN-tukiasemat sijaitsevat rakennuksen sisällä, ei vastaavia ongelmia esiinny tämän tekniikan kanssa.

Sovelluksen vaatimasta paikannustarkkuudesta riippuen paikannusjärjestelmiä on toteutettu eri menetelmillä. Karkeammalla tarkkuudella toimivissa järjestelmissä paikannus voidaan suorittaa yhden tukiaseman tarkkuudella. Näissä tapauksissa tukiasemilta haetaan tieto kutakin tukiasemaa käyttävistä asiakkaista ja tämän tiedon pohjalta saadaan selville asiakkaiden sijainnit. Näiden järjestelmien paikannustarkkuus riippuu tukiasemien kuuluvuusalueiden koosta. Tarkkuus voi periaatteessa olla jopa muutamien metrien luokkaa, mikäli tukiasemien kuuluvuus rajoittuu radiosignaaleja läpäisemättömien rakenteiden sisään. Normaleissa toimistotiloissa tukiaseman kuuluvuusalue on muutamia kymmeniä metrejä ja tällöin paikannustarkkuus heikkenee vastaavasti [Sma00].

4.1 Signaalitasomittaukset paikannuksessa

Parempaan paikannustarkkuuteen pyrkivissä järjestelmissä on siirryttävä käyttämään signaalien mittausta tukiasemien ja asiakkaan välillä. Yleisimmin käytössä oleva tapa

toteuttaa signaaliarvoja hyödyntävä paikannusjärjestelmä on kehittää asiakkaan langattomaan päätelaitteeseen tukiasemien signaaleja mittaava ohjelma. Tämä ohjelma on oltava jokaisessa paikannettavassa päätelaitteessa. Ohjelma mittaa langattoman verkkokortin ajurin avustuksella päätelaitteen ja kaikkien kuultavissa olevien tukiasemien väliset signaalien voimakkuudet. Näitä tietoja verrataan tietokantaan, jossa on valmiiksi koottu signaaliarvot koko paikannusjärjestelmän alueelta Parhaiten vastaava arvojoukko valitaan tietokannasta ja tätä arvojoukkoa vastaava fyysinen sijainti ilmoitetaan käyttäjälle.

Signaalin voimakkuuden havainnoitiin perustuvissa paikannusjärjestelmissä voidaan hyödyntää myös signaalin etenemiseen kehitettyjä malleja. Mallien avulla pyritään laskemaan mahdollisimman tarkasti, miten signaali muuttuu edettyään tietyn matkan tietynlaisessa ympäristössä. Tapauksesta riippuen mallit ottavat huomioon signaalien heikkenemisen, heijastumisen ja monitie-etenemisen vaikutuksen alkuperäiseen signaaliin.

Tutkimuksessa [Bah00a] hyväksi havaittu menetelmä on Seidelin ja Rappaportin esittämä etenemismalli, jossa käytetään kerrosten välistä vaimennuskerrointa (Floor Attenuation Factor) signaalin heikkenemisen laskemiseksi [Sei92]. Mallia voidaan soveltaa kerrosten välisen vaimennuksen sijasta myös seinien vaimennuksen laskemiseen. Seuraavalla kaavalla voidaan laskea signaalin voimakkuus etäisyydellä d lähettimestä.

$$P(d)[dBm] = P(d_0)[dBm] - 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) - WAF \quad , \quad (2)$$

missä $P(d_0)$ = signaalin voimakkuus vertailupisteessä d_0
 d = lähettimen ja vastaanottimen välinen etäisyys
 n = signaalin vaimennuskerroin suhteessa etäisyyteen
 WAF = seinän vaimennuskerroin (Wall Attenuation Factor)

Arvot n ja WAF riippuvat mittaustilan rakennusmateriaaleista ja nämä on yleensä selvitetty kokeellisesti. Bahlin esittämässä mallissa yhden seinän mittauksen tuottama WAF -arvo on suoraan kerrottu seinien lukumäärällä, mutta tarkempi tulos kaavasta saadaan mittaamalla erilliset WAF -arvot seinien lukumäärän mukaan. Käytännössä WAF -arvo kasvaa tiettyyn rajaan asti, jonka jälkeen seinien lukumäärällä ei ole merkittävää vaikutusta. $P(d_0)$ voidaan myös selvittää kokeellisesti tai se voi olla etukäteen laitteistolle määritelty.

Janan leikkausalgoritmin (Cohen-Sutherland line-clipping algorithm) [Fol90] avulla rakennuksen pohjapiirroksista lasketaan, kuinka monta seinää jää tukiaseman ja asiakkaan väliselle janalle. Yhdistämällä edellä esitetty signaalin etenemismalli (kaava 2) ja janan leikkausalgoritmi saadaan aikaiseksi järjestelmä, jolla voidaan laskea arvio signaalin voimakkuudesta halutussa pisteessä. Useista tukiasemista saatavista signaalitiedoista voidaan jälleen arvioida asiakkaan fyysinen sijainti rakennuksessa.

Laskennallisilla menetelmillä saatava paikannustulos ei ole niin tarkka kuin mittaamalla laadittu tukiasemien kuuluvuuskartta voi parhaimmillaan olla. Suuremman ihmisjoukon tavoin myös yksittäinen ihminen vaikuttaa kehollaan signaalien etenemiseen. Käyttäjän seistessä suoraan päätelaitteensa ja tukiaseman välissä voi hänen itsensä aiheuttama signaalin heikkeneminen muuttaa ratkaisevasti vastaanotetun signaalin voimakkuutta. Näiden tilanteiden huomioiminen laskennallisilla menetelmillä on vaikeaa, mutta kattavien mittaustulosten avulla paikannustarkkuus voi parantua. Microsoftin tutkimusprojektin RADAR-paikannusjärjestelmän kokeellisesti laaditun kuuluvuuskartan avulla paikannustarkkuuden mediaani oli hiukan alle kolme metriä, kun laskennallisella menetelmällä testitulosten mediaani kasvoi yli neljään metriin [Bah00a].

4.2 Signaalitasojen suodatus

Signaalitasoihin perustuvassa paikannuksessa on usein ongelmana signaalin voimakkuuden suhteellisen suuri vaihtelu, vaikka päätelaite ei olisi juurikaan liikkunut

mittausten välillä. On myös mahdollista, että mittaus heikosti kuuluvista tukiasemista jää hetkellisesti saamatta. Näissä tilanteissa syntyvät suurimmat virheet signaalitasoihin pohjautuvassa paikannusjärjestelmässä. Virheiden suodattamiseksi tutkimuksissa [Lat99] ja [Lat00] esitetään laajennetun Kalman-suotimen (EKF, Extended Kalman-Filter) käyttämistä. Alkuperäinen Kalman-suodin on tarkoitettu lineaaristen ongelmien arviointiin mittaus- sekä historiatietojen pohjalta rekursiivisesti. Laajennetussa suotimessa hyödynnetään Taylorin sarjakehitelmää muutettaessa suodin toimimaan epälineaaristen ongelmien kanssa, jollainen on myös signaalitasojen laskenta suhteessa etäisyyteen.

Suotimelle annetaan alkuarvoina paikannuksen lähtökoordinaatit ja virhekovarianssimatriisi. Mittaustuloksia syötetään suotimeen jokaisella iteraatiokierroksella, mikäli niitä on saatavilla. Suodin arvioi paikan perustuen alkuarvoihin sekä mittaustuloksiin. Painotus näiden arvojen välillä riippuu vahvistusmatriisista, jonka suodin muodostaa virhekovarianssimatriisista. Alussa vahvistusmatriisi painottaa laskennassa enemmän mittaustuloksia, mutta iteraatiokierrosten määrän kasvaessa laskettujen arvojen painotus kasvaa. Uudella kierroksella sama prosessi toistuu alkuarvoinaan edellisen kierroksen tulokset.

Tutkimuksen [Lat99] keskimääräiseksi virheeksi mitattiin 2,7 metriä. Toisessa tutkimuksessa [Lat00] erilaisessa ympäristössä virhe oli lähellä samaa arvoa ollen kolme metriä. Suotimesta johtuen järjestelmän tuottama paikka-arvio mukailee todellista sijaintia hiukan jäljessä, sillä järjestelmän arviioon vaikuttavat edellisten iteraatiokierrosten tulokset. Suotimessa on kuitenkin mahdollista käyttää nopeusparametreja, joiden avulla suodin korjaa vaihtelevalla nopeudella liikkuvan kohteen paikka-arviota. Tulosten mukaan suotimesta huolimatta paikannustarkkuus huononee tukiaseman ja päätelaitteen välimatkan kasvaessa.

Tutkimuksessa [Hel01] on EKF-suodinta hyödyntävän järjestelmän paikannustarkkuutta parannettu suorittamalla kalibrointivaihe ennen järjestelmän käyttöönottoa uudessa toimintaympäristössä. Kalibroinnissa tukiasemille muodostetaan vaimennusfunktiot sijainnista riippuen. Esimerkiksi tukiasemat, joita ympäröivät radioaaltoja voimakkaasti

heikentävät rakenteet, saavat erilaiset vaimennusfunktiot kuin vapaassa tilassa toimivat tukiasemat. Funktioita hyödyntämällä tukiasemista mitatuille signaalitasoille voidaan laskea vastaavat fyysiset etäisyydet mahdollisimman tarkasti.

Funktion määrittäminen kullekin tukiasemalle vaatii runsaasti signaalitasojen mittauksia kalibrointivaiheessa. Tukiasemista vastaanotettujen signaalitasojen perusteella jokaiselle tukiasemalle muodostetaan ominainen ensimmäisen asteen lineaarinen funktio. Tämän funktion avulla lasketaan paikannusvaiheessa tukiasemalle vaimennuskerroin, joka on riippuvainen sijainnista paikannushetkellä. Sijainti funktion laskemiseksi saadaan EKF-suotimen edellisen kierroksen tuloksena ja uudet mittausravot vaimennuskertoimella korjattuina syötetään jälleen suotimeen. Testitulokset kalibrointia käyttävässä järjestelmässä tuottavat 1,5 metrin keskimääräisen virheen. [Hel01]

4.3 Aikamittaukset paikannuksessa

Toinen menetelmä paikannustarkkuuden parantamiseksi on radiosignaalin etenemiseen kuluvan ajan mittaaminen ja etäisyyden laskenta tämän tiedon pohjalta. Perusteet signaalin saapumisajan mittauksiin perustuviin paikannusmenetelmiin on esitetty kappaleissa 2.2.3 ja 2.2.4. Signaalin saapumisaikamenetelmää on tutkittu lähteessä [Xin00]. Ongelmana tässä menetelmässä on tukiasemien ja päätelaitteen synkronointi. Liikkuvan päätelaitteen sijainti suhteessa tukiasemiin on tuntematon, eikä synkronointia täten voida toteuttaa tarkasti.

Päätelaitteen synkronointitarpeen voi eliminoida mittaamalla edestakaisen signaalin etenemisajan. Tässä menetelmässä päätelaitteen ajalla ei ole merkitystä, vaan tukiasemien keskinäinen synkronointi riittää. Tukiasemat lähettävät päätelaitteelle signaalin, joka käsitellään asemassa ja ennalta sovitun ajan kuluttua päätelaite vastaa tukiasemalle. Signaalin yhteen suuntaan etenemiseen käyttämä aika voidaan tällöin laskea kaavalla 3.

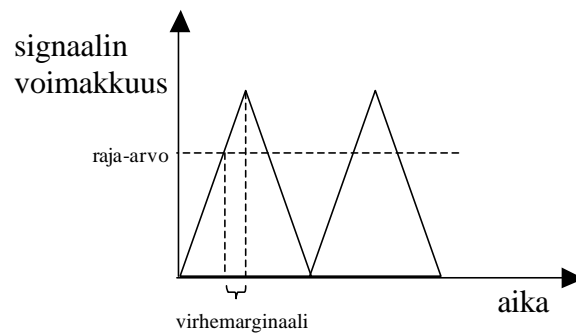
$$TOA = \frac{(t_1 - t_0 - t_p)}{2}, \quad (3)$$

missä t_0 = aika, jolloin tukiaseman lähetys aloitetaan
 t_1 = aika, jolloin tukiasema vastaanottaa päätelaitteen vastauksen
 t_p = päätelaitteen käyttämä aika datan vastaanottoon ja prosessointiin

t_p sisältää myös odotusajan (SIFS, Shortest Interframe Space), jonka aikana kaista on vapaa edellisen lähetyksen päätyttyä. Menetelmän tarkkuus ei kuitenkaan riitä paikannukseen, sillä standardi sallii odotusajan vaihtelevan jopa kaksi mikrosekuntia ja näin suuren epätarkkuuden aiheuttama virhe vastaa 600 metrin virhettä paikannustuloksessa.

Parannettu aikamittausmenetelmä koostuu tukiasemien ja päätelaitteiden lisäksi paikannusreferenssipisteistä (GRP, Geolocation Reference Point). Nämä pisteet toimivat ainoastaan radiosignaalien mittauspisteinä, eikä niitä käytetä datan lähetykseen tukiaseman tavoin. Laitteistona on käytössä radiovastaanotin, jonka avulla voidaan mitata vastaanotettujen signaalien saapumisaika hyvin tarkasti. Pisteiden sijainti tukiasemaan nähden on tunnettu, joten tukiaseman lähettämän signaalin kulkuaika on tiedossa. Kun päätelaite vastaa tukiaseman signaaliin, mittaavat paikannusreferenssipisteet signaalin saapumisajan. Mittauspisteiden kellot on synkronoitu keskenään ja päätelaitteen etäisyys voidaan laskea mitattujen kellonaikojen perusteella signaalin saapumisaikaerotus -menetelmää hyödyntäen.

Menetelmän paikannustarkkuus riippuu mittaustarkkuudesta. Mittauspisteiden on löydettävä signaalista synkronointiin tarkoitettujen symbolien huippuarvot, jotta tarkka tahdistus ja mittaus olisi mahdollista. Huippuarvojen löytäminen perustuu kolmikulmaisten tahdistussymbolien huippuarvojen erottamiseen pitkän symbolijonon joukosta. (Kuva 14)



Kuva 14: Virhemarginaali symbolin synkronoinnissa

Ennalta asetettu raja-arvo määrittelee, mikä signaalin voimakkuusarvo riittää huippuarvon tunnistamiseen. Raja-arvoa muuttamalla voidaan tarkentaa tahdistusta, mutta samalla virheiden määrä kasvaa. Lähteen [Xin00] mukaan tahdistustarkkuus on virheiden määrän ja tarkkuuden suhteen parhaimmillaan noin 20 ns. Tästä johdettuna paikannustarkkuus olisi alle kymmenen metriä, mutta tutkimuksessa ei asiaa käsitellä näin laajasti, eikä todellisesta paikannustarkkuudesta ole esitetty mittaustuloksia.

4.4 Älykkäät paikannusjärjestelmät

Paikannustuloksen tarkkuutta on mahdollista parantaa lisäämällä järjestelmään älykkyyttä, jonka avulla mahdottomat paikannustulokset voidaan karsia mahdollisten vastausten joukosta. Luomalla tarkka kuva paikannusalueen kattamasta rakennuksen pohjapiirroksista voidaan älykkäillä järjestelmillä huomioida virheet mittaustuloksissa, joiden mukaan käyttäjän sijainti olisi siirtynyt seinän toiselle puolella ovea käyttämättä. Samoin monikerroksisissa rakennuksissa paikannettaessa käyttäjiä usean kerroksen alueella havaitaan historiatietojen hyödyllisyys, sillä paikannustuloksen mahdottomat siirtymät kerroksesta toiseen voidaan poistaa.

Microsoftin tutkimusryhmä on lisännyt RADAR-paikannusjärjestelmäänsä älykkyyttä myös siten, että järjestelmä huomioi radioverkon muutokset, jotka johtuvat ulkopuolisista tekijöistä. Esimerkiksi ihmisten määrän huomattava kasvaminen

paikannusverkon alueella vaikuttaa merkittävästi radiosignaalien käyttäytymiseen. RADAR-järjestelmässä tukiasemat mittaavat toistensa kuuluvuutta jatkuvasti. Koska tukiasemien sijainti pysyy vakiona, voidaan päätellä, että muutokset kuuluvuudessa johtuvat ulkopuolisista muutoksista radioverkon alueella. Järjestelmä kerää tukiasemien mittaaman tiedon ja arvio sitä tietyn aikavälin sisällä. Jos signaalitasojen muutos ylittää määritellyn rajan, paikannusjärjestelmä huomioi ympäristön muuttuneen riittävästi ja ottaa käyttöön kyseiseen tilanteeseen sopivan ennalta lasketun kuuluvuuskartan. Kuuluvuuskarttoja tarvitaan näin ollen useampia ja näiden työstämiseen on paikannusjärjestelmän alustuksen yhteydessä käytettävä aikaa. Tulokset ovat kuitenkin niin lupaavia, että tarkkuutta vaativassa paikannusjärjestelmässä kuuluvuuskarttojen työstämiseen kannattaa käyttää resursseja [Bah00b].

Tutkimuksessa [Cap02] esitetään menetelmä tilapäisten (Ad-Hoc) verkkojen sisäisen koordinaatiston luomiseksi. Koska koordinaatisto on verkon sisäinen, sillä ei välttämättä ole määrättyä suhdetta maantieteelliseen koordinaatistoon. Suhteen muodostaminen on kuitenkin mahdollista, mikäli verkon sisäiselle koordinaatistolle syötetään tieto maantieteellisestä sijainnista esimerkiksi GPS-järjestelmää käyttäen.

Sisäistä koordinaatistoa muodostettaessa verkon jokainen solmukohta eli asema mittaa etäisyyden naapurisolmuhinsa, jotka sijaitsevat menetelmän määrittelemän maksimietäisyyden sisällä. Paikallinen koordinaatisto muodostetaan trigonometrisia kaavoja käyttäen, kunhan etäisyydet on mitattu. Näin syntyneet paikalliset koordinaatistot mukautetaan koko verkon kattavaan koordinaatistoon. Verkkokoordinaatiston keskipiste määritellään alueelle, jossa asematiheyden lasketaan olevan suurin verkon alueella. Tutkimuksessa ei oteta kantaa, kuinka solmujen välinen etäisyysmittaus suoritetaan, mutta mahdollisiksi menetelmiksi mainitaan signaalin voimakkuuteen ja signaalin saapumisaikaan perustuvat menetelmät. Koordinaatiston tarkkuus on riippuvainen mittausten tarkkuudesta ja virheet lähellä koordinaatiston keskipistettä kertautuvat helposti siirryttäessä kauemmas origosta.

5 PAIKANNUSPALVELUN TOTEUTTAMINEN

Työssä tutkittiin langattoman aseman paikantamista 802.11-verkossa eri näkökulmista. Paikannusmenetelmiä on useita ja valinta niiden välillä on tehtävä ottaen huomioon palvelun vaatima paikannustarkkuus, menetelmän tuottama verkon kuormitus sekä paikannettavien asemien mahdollisuudet ottaa osaa paikannuksen aikaisiin toimintoihin.

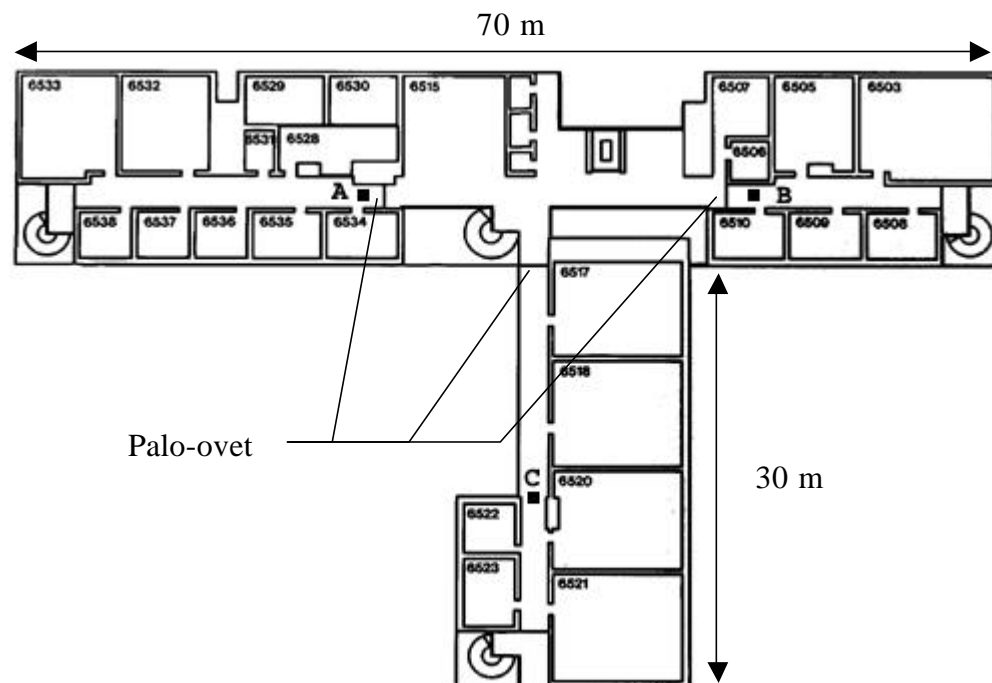
Paikannustarkkuus asettaa vaatimuksia paikannusmenetelmälle. Tarkkuusvaatimus perustuu paikkatietoa hyödyntävän palvelun olemukseen. Esimerkiksi suuressa ostoskeskuksessa paikannuksen tarkkuudeksi voi riittää yhden tukiaseman kuuluvuusalue. Kunkin tukiaseman alue voisi tällöin kattaa tietyn osaston ostoskeskuksessa ja näin ollen asiakas voitaisiin paikantaa tuoteosaston tarkkuudella [Ikk01]. Rakennuksen radioaaltojen käyttäytymiseen vaikuttavista ominaisuuksista riippuen tällöin puhutaan muutamien kymmenien metrien paikannustarkkuudesta. Tässä työssä toteutettu tukiasemien kuuluvuusalueiden tarkkuudella paikantava solupaikannusjärjestelmä esitellään kappaleessa 5.2.

Tarkempaa paikannusta vaaditaan palvelussa, jonka avulla käyttäjää opastetaan kulkemaan rakennuksessa pisteestä A pisteeseen B. Mikäli rakennus on sokkeloinen ja kulkuohjeita halutaan antaa hyvin tarkasti, voidaan tällöin tarkkuusvaatimukseksi asettaa muutaman metrin paikannustarkkuus. Pekka Jäppisen diplomityössään [Jäp01] esittelemä opastejärjestelmä on suunniteltu käytettäväksi Bluetooth-tekniikan kanssa. Paikannuksen tarkkuuden kannalta tämä tekniikka on hyvä valinta, sillä jo pienempien tukiasemasolujensa ansiosta Bluetooth-verkon paikannustarkkuus on parempi kuin tarkkuus IEEE 802.11 -standardin mukaisissa verkoissa.

Paikannustarkkuutta voidaan 802.11-verkossa parantaa ottamalla tarkasteluun asemien väliset signaalitasot. Fyysinen kerros mittaa jatkuvasti vastaanotetun signaalin voimakkuutta ja tämän tuloksen perusteella tapahtuu mm. tukiaseman valinta. WLAN-verkossa voidaan täten hyödyntää kappaleessa 2.2.2 esiteltyä signaalin voimakkuuteen perustuvaa paikannusmenetelmää. Signaalitasopaikannuksen toteutus käsitellään kappaleessa 5.3.

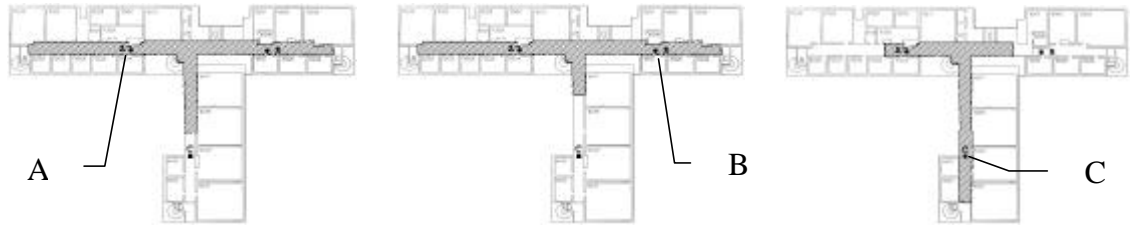
5.1 Toteutusympäristö

Testiverkkona työssä on käytetty kolmen IEEE 802.11b -standardin mukaisen tukiaseman muodostamaa verkkoa, joka on asennettu toimistorakennukseen normaalia tuotantokäyttöä silmällä pitäen. Tukiasemien sijoittelussa on siis huomioitu ensisijaisesti verkkoyhteyden laatu toimitiloissa, mutta tukiasemille valitut paikat sopivat hyvin myös paikannustarpeisiin. Kuvassa 15 on esitetty rakennuksen pohjapiirros tukiasemineen (neliöt A, B ja C). Kuvassa näkyvien käytäviä erottavien palo-ovien materiaalina on metalliverkolla vahvistettu lasi.



Kuva 15: Testitilan pohjapiirros

Tukiasemien A, B ja C kuuluvuusalueet on esitetty erikseen kuvassa 16. Kunkin tukiaseman kuuluvuusalue testitilan käytävillä on kuvattu tumman harmaana alueena.



Kuva 16: Testiverkon tukiasemien kuuluvuusalueet

Tukiasemien käyttämät kanavat ovat 12, 8 ja 4. Kanavia ei ole voitu valita optimaalisesti kappaleessa 3.2.2 esitetyn käytännön mukaan, sillä rakennuksen muihin kerroksiin sijoitettujen tukiasemien lähetykset kuuluvat osittain myös testiverkon kerroksessa ja täten varaavat osan kanavista. Kaikilla tukiasemilla on kaapeloitu ethernet-yhteys.

5.2 Solupaikannus

Solupaikannus voidaan suorittaa palvelimelta käsin ilman asiakkaan vuorovaikutusta. Näin ollen asiakas ei tarvitse erityistä ohjelmaa paikannukseen ja paikannus onnistuu millä WLAN-päätelaitteella hyvänsä, kunhan vain yhteys verkkoon on kunnossa ja päätelaite on yhteensopiva verkon tukiasemien kanssa. Haittapuolena palvelimen suorittamassa solupaikannuksessa on paikannustuloksen epätarkkuus, mikäli paikannusta hyödyntävät palvelut vaativat tarkkaa paikannusta.

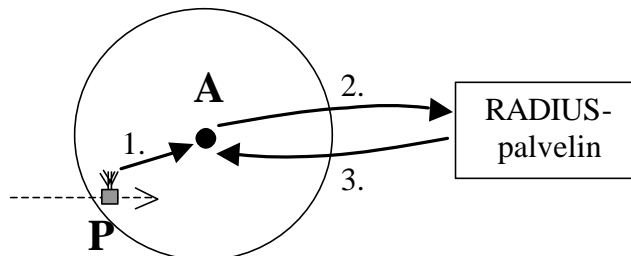
5.2.1 Solupaikannuksen toteutus

Solupaikannus perustuu tietoon päätelaitteen käyttämästä tukiasemasta, joten paikannuspalvelun on kyettävä löytämään tukiasemien joukosta se tukiasema, jota paikannettava päätelaite käyttää. Yksi tapa löytää kyseinen tukiasema on kyselyiden lähettäminen kaikille verkon tukiasemille.

Testiverkon jokainen tukiasema antaa verkon ylläpitäjälle mahdollisuuden kommunikoida tukiaseman kanssa SNMP- (Simple Network Management Protocol) protokollaa [RFC1157] käyttäen. Protokollan avulla tukiasemaa voidaan käskyttää suorittamaan päätelaitteiden etsintä tukiaseman kanavalla. Vastaus saadaan myös SNMP-protokollan avulla ja vastauksen perusteella löydetään päätelaitteen käyttämä tukiasema. Kyselyiden lähettäminen verkon kaikille tukiasemille ei kuitenkaan ole paras tapa solupaikannuksen toteuttamiseksi, sillä tukiasemien määrän kasvaessa kasvaa myös kyselyiden aiheuttama verkon kuormitus.

Yksinkertaisempi menetelmä päätelaitteen käyttämän tukiaseman löytämiseksi hyödyntää testiverkon tukiasemien ja RADIUS- (Remote Authentication Dial-In User Service) palvelimen [RFC2138] välistä yhteydenpitoa. Menetelmä vaatii tukiasemilta tuen RADIUS-palvelimelle. RADIUS-palvelimen tarkoitus on sallia hyväksytyjen päätelaitteiden pääsy verkkoon ja vastaavasti evätä niiden päätelaitteiden pääsy, joita verkon ylläpito ei ole hyväksynyt.

Testiverkon tukiasemat mahdollistavat RADIUS-palvelimen käyttämisen päätelaitteiden autentikointiin (Kuva 17). Kun päätelaite P luo yhteyden uuden tukiaseman A kanssa (vaihe 1) esimerkiksi siirryttyään uuden tukiaseman kuuluvuusalueelle, tukiasema havaitsee päätelaitteen uudeksi asiakkaaksi ja kysyy RADIUS-palvelimelta, onko uuden päätelaitteen laitteisto-osoite sallittujen osoitteiden listalla (vaihe 2). Mikäli RADIUS-palvelin sallii osoitteen käyttämisen verkossa (vaihe 3), hyväksyy tukiasema päätelaitteen asiakkaakseen ja vasta tämän jälkeen päätelaitteen verkkoliikenne välitetään tukiaseman läpi.



Kuva 17: Tukiasema ja RADIUS-palvelin

Jokaisesta tukiaseman esittämästä kyselystä jää merkintä RADIUS-palvelimen lokitiedostoon. Lokista selviää kyselyn lähettäneen tukiaseman osoite sekä päätelaitteen laitteisto-osoite. Tiedossa on siis aina päätelaitteen viimeisin sijainti verkossa ja päätelaitetta palvelleeseen tukiaseman osoite. Näin ollen lokitiedostoa tulkitsemalla voidaan jokainen päätelaite paikantaa tukiaseman tarkkuudella. Menetelmä käyttäminen ei vaikuta tukiasemien eikä verkon suorituskykyyn ja toiminta on nopeaa. Mikäli halutaan varmistua siitä, että päätelaite on paikannushetkelläkin löydetyn tukiaseman asiakas, voidaan tukiasemalle lähettää SNMP-kysely. Vastauksen perusteella joko havaitaan päätelaitteen olevan tukiaseman asiakkaana tai vaihtoehtoisesti päätelaite on poistunut verkosta.

5.2.2 Paikannustarkkuus

Solupaikannuksessa paikannustarkkuus riippuu verkon solujen koosta. Kuvan 16 mukaan testiverkon tukiasemat kattavat 70 metriä pitkän käytävän kokonaan siltä alueelta, jossa radioaallot etenevät lähes esteettä. Seurauksena tästä paikannustarkkuus solupaikannuksen osalta testitulosten mukaan on ± 50 metriä. Tarkasteltaessa vain tukiasemaa C, paikannustarkkuus paranee noin 10 metriä ollen tällöin ± 40 metriä.

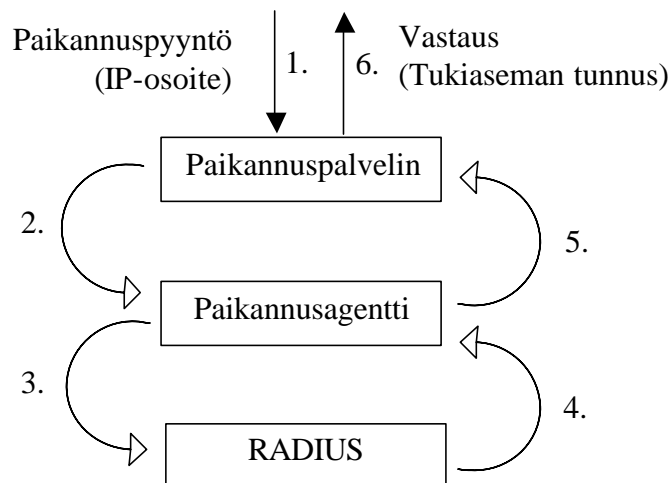
Testiverkon tavoin monisoluisissa verkoissa solujen kuuluvuusalueet usein ovat osittain päällekkäisiä, jotta päätelaitteiden verkkoyhteyden ei tulisi katkoksia siirryttäessä yhden solun alueelta toiselle. Tästä johtuen paikannustulos voi solupaikannusta käytettäessä vaihdella alueilla, joilla useampi tukiasema on kuultavissa. Tulos riippuu päätelaitteen ja tukiasemien ominaisuuksista, jotka vaikuttavat tukiaseman valintaan.

Päätelaitteen liittyessä verkkoon se käy läpi kaikki mahdolliset kanavat ja kerää tiedot kuultavista tukiasemista. Jos etsinnän tuloksena löytyy useampia tukiasemia, joiden asetukset sopivat päätelaitteen vastaaviin asetuksiin, päätelaite valitsee tukiasemista sen, jonka lähettämä signaali on voimakkain ja liittyy verkkoon tämän tukiaseman välityksellä. Liittymisen jälkeen päätelaite jatkaa signaalin voimakkuuden tarkkailua palvelevasta tukiasemasta. Mikäli signaalin voimakkuus laskee tietyn raja-arvon alle,

päätelaite suorittaa jälleen kanavien skannauksen. Jos voimakkaampi signaali on kuultavissa toisesta tukiasemasta, päätelaite pyrkii siirtymään tämän tukiaseman asiakkaaksi. Raja-arvo uuden tukiaseman etsinnän aloittamiseksi on karkealla tasolla määriteltävissä testiverkon tukiasemien asennuksen aikana.

5.2.3 Paikannuspalvelu

Paikannuspalvelu koostuu paikannuspalvelimesta, paikannusagentista ja RADIUS-palvelimen lokitiedostosta. Paikannusagentin tehtävänä on suorittaa tietojen etsintä RADIUS-lokitiedostosta, mikäli paikannuspalvelinta ja RADIUS-palvelinta ajetaan eri koneissa.



Kuva 18: Paikannuspalvelu

Paikannuspalvelun toiminta vaiheittain kuvassa 18:

1. Paikannuspalvelin vastaanottaa paikannuspyynnön, joka sisältää paikannettavan päätelaitteen IP-osoitteen. Palvelin selvittää IP-osoitetta vastaavan laitteisto-osoitteen.

2. Paikannuspalvelin avaa yhteyden paikannusagenttiin ja lähettää paikannettavan päätelaitteen laitteisto-osoitteen agentille.
3. Paikannusagentti suorittaa haun RADIUS-lokitiedostosta laitteisto-osoitteen perusteella.
4. Mikäli haku tuottaa tulosta, saa paikannusagentti tiedon päätelaitteen viimeisimmästä sijainnista tukiaseman osoitteen muodossa.
5. Paikannusagentti palauttaa vastauksen paikannuspalvelimelle.
6. Paikannuspalvelin palauttaa vastauksen paikannuspalvelun asiakkaalle.

5.2.4 Sovellusrajapinta

Paikannuspalvelun sovellusrajapinta on toteutettu käyttäen XML-RPC- (Extensible Markup Language – Remote Procedure Call) kutsuja [Xml02]. XML-RPC:tä hyödyntäen asiakas ja palvelin keskustelevat XML-muotoisten dokumenttien välityksellä. Dokumenteissa määritellään funktiokutsut, parametrit sekä paluuarvot. XML-RPC-protokolla lähettää kutsunsa HTTP- (Hypertext Transfer Protocol) protokollaa käyttäen [RFC2616].

Paikannuspalvelua kutsutaan funktiolla ja mukaan liitetään parametrina paikannettavan päätelaitteen IP-osoite. Palvelu sisältää kaksi funktiota, jotka on parametreineen listattu taulukossa 2. Ensimmäinen funktioista (locate_no_strength) suorittaa yksinkertaisen kappaleessa 5.2.3 esitetyn solupaikannuksen. Toinen funktio palauttaa solupaikannuksen lisäksi myös tukiaseman ja päätelaitteen välisen signaalin voimakkuuden, joka voidaan pyytää tukiasemalta SNMP-protokollan avulla. Tämän arvon perusteella voidaan karkeasti arvioida päätelaitteen etäisyyttä tukiasemasta ja osassa tapauksista parantaa paikannustarkkuutta.

Taulukko 2: XML-RPC kutsut

Funktio	Parametri	Arvojoukko
locate_no_strength	String ip	IP-osoite
locate_strength	String ip	IP-osoite

Taulukko 3: XML-RPC paluuarvot

Funktio	Paluuarvo	Arvojoukko
locate_no_strength	String location_id	0, 1, 2
	String location_msg	Tukiasema tai virhe
locate_strength	String location_id	0, 1, 2
	String location_msg	Tukiasema tai virhe
	Int location_strength	0-100

Taulukossa 3 on listattu paikannuspalvelun paluuarvot kummallekin funktiolle. Taulukossa esiintyvä location_id-kenttä kertoo asiakkaalle paikannuksen aikana tapahtuneista virheistä numerokodein. location_msg-kentässä lähetetään tukiaseman nimi tai vaihtoehtoisesti virheen syy tekstimuodossa. location_strength-kenttä kertoo suuntaa-antavasti tukiaseman ja päätelaitteen välisen signaalin voimakkuuden. Taulukossa 4 on esitetty location_id-kentän numerokoodien selitykset.

Taulukko 4: Paluuarvojen koodaus

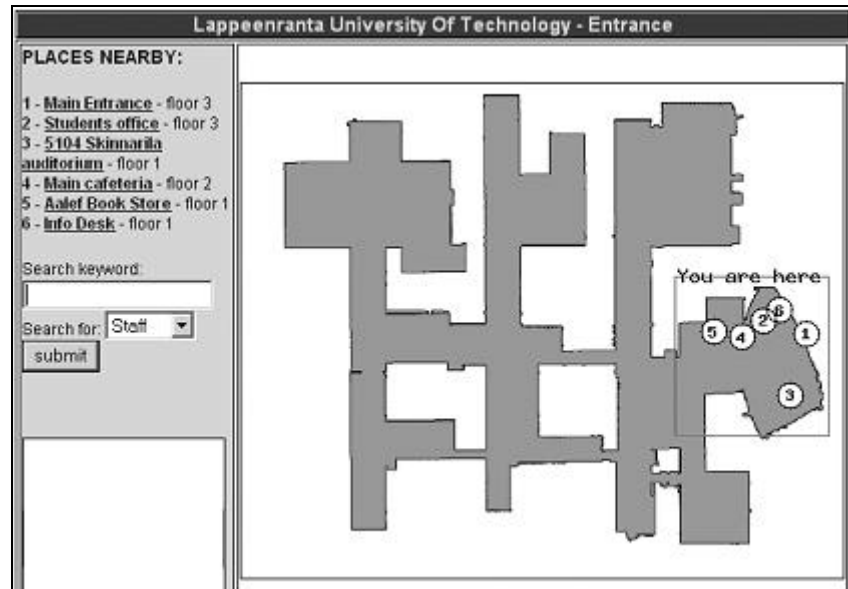
Koodi	Selitys
0	Onnistunut paikannus
1	Paikkaa ei löytynyt
2	Tuntematon parametri

Paluuarvon numerokoodilla on kolme vaihtoehtoista arvoa. Arvo 0 kertoo paikannuksen onnistuneen ja koodin ohessa palautetaan paikannustulos. Arvo 1 merkitsee paikannuksen epäonnistuneen. Arvo 2 palautetaan silloin, kun paikannuspalvelin ei tunnista parametrina saamaansa IP-osoitetta tai osoite on valittu sallitun osoitevaruuden ulkopuolelta.

5.2.5 Paikannusta hyödyntävät palvelut

Paikannuspalvelun ohien on kehitetty kaksi palvelua, jotka hyödyntävät paikannuspalvelun mahdollisuuksia. Toinen palveluista toteuttaa graafisen WWW-

käyttöliittymän verkon käyttäjien paikannukseen. Palvelu esittää käyttäjän sijainnin neliöitynä alueena kartalla tai rakennuksen pohjapiirroksella. Samalla käyttäjä näkee kiinnostavat kohteet merkittynä samaan kuvaan ja saa mahdollisesti muuta tietoa sijaintiin liittyen. (Kuva 19)



Kuva 19: Käyttöliittymä paikannuspalvelulle

Toinen palvelu luo verkon käyttäjille mainoksia tai muita ilmoituksia sijainnin perusteella. Ilmoituksilla on tietty alue, jonka sisällä niitä näytetään käyttäjille. Palvelu pyytää tietoa käyttäjän sijainnista paikannuspalvelulta ja esittää ilmoitukset esimerkiksi liittämällä ne HTML-sivuille, joita käyttäjälle välitetään.

5.3 Paikannus signaalin voimakkuuden perustuen

Signaalin voimakkuuden perustuvalla paikannuksella pyritään parantamaan paikannustarkkuutta, joka esimerkiksi solupaikannuksessa ei ole kaikkien palveluiden kannalta riittävä. Mittaamalla signaalin voimakkuus päätelaitteen ja usean tukiaseman välillä voidaan päätelaitteen sijainti määrittää tarkemmin olettaen, että mittaukset tuottavat yksiselitteisen tuloksen. Mittauksia varten päätelaitteeseen tarvitaan erityinen

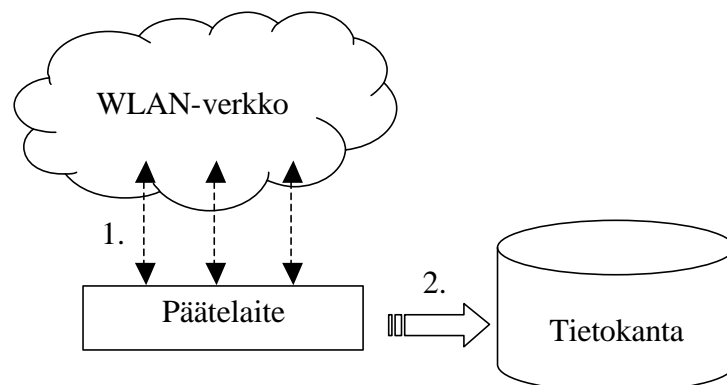
ohjelma ja tämä vaatimus rajoittaa signaalitasomittaukseen sopivien päätelaitteiden valikoimaa.

Järjestelmä perustuu asiakas-palvelin -malliin, jossa asiakkaana toimiva päätelaite antaa palvelimelle syötteen ja saa vastauksen palvelimelta suorituksen päättyessä. Lisäksi järjestelmään kuuluu tietokanta, jota pääsääntöisesti käyttää palvelin, mutta alustusvaiheessa tietokanta voidaan täyttää suoraan päätelaitteesta käsin.

5.3.1 Alustusvaihe

Paikannusmenetelmään kuuluu olennaisen osana järjestelmän alustusvaihe, jonka aikana tietokantaan kerätään paikannusalueelta mallipisteitä signaalitasoineen. Alustusvaihe on suoritettava aina, kun paikannusaluetta muutetaan tai alueella tapahtuu muita muutoksia, jotka vaikuttavat radioaaltojen käyttäytymiseen.

Alustusvaiheessa alueen kartoitus suoritetaan samanlaisella päätelaitteella kuin paikannuskin on tarkoitus suorittaa. Päätelaitteen alustusvaiheen ohjelma eroaa paikannusvaiheen ohjelmasta siten, että alustusvaiheessa päätelaite kommunikoi suoraan tietokannan kanssa ja tallettaa kantaan paikannusvaiheessa käytettävät signaalien voimakkuuksien vertailuarvot. Myös koordinaatit talletetaan kantaan alustusvaiheessa.



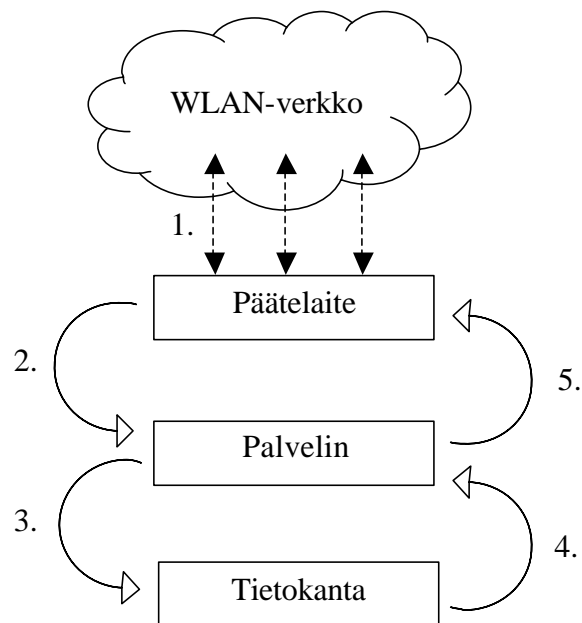
Kuva 20: Alustusvaihe

Kuvassa 20 esitetyn järjestelmän alustusvaiheen toiminta on seuraavaa:

1. Pääteleite kuuntelee verkkoa ja vastaanottaa beacon-kehyksiä mahdollisimman monesta tukiasemasta sekä mittaa signaalin voimakkuuden näihin tukiasemiin.
2. Pääteleite avaa yhteyden tietokantaan ja luo tauluun uuden rivin, johon talletetaan sijaintiin liittyvät koordinaatit ja signaalitasot.

5.3.2 Paikannusvaihe

Paikannusvaiheessa järjestelmään tulee mukaan palvelin, joka vastaanottaa asiakkaan lähettämät tiedot ja suorittaa tietokantahaut. Tarkempi kuvaus järjestelmän osien toiminnasta on esitetty kappaleissa 5.3.3, 5.3.4 ja 5.3.5.



Kuva 21: Paikannusvaihe

Kuvassa 21 esitetyn paikannusvaiheen toiminta on seuraavaa:

1. Päätelaitte kuuntelee verkkoa ja vastaanottaa beacon-kehyksiä mahdollisimman monesta tukiasemasta sekä mittaa signaalin voimakkuuden näihin tukiasemiin.
2. Päätelaitte lähettää mittaustuloksen kootusti palvelimelle
3. Palvelin hakee tietokannasta tiedot päätelaitteen havaitsemista tukiasemista.
4. Tietokantahaun tuloksena syntyy listaus tukiasemista, signaalitasoista ja niihin liittyvistä koordinaateista, joiden avulla palvelin arvioi päätelaitteen sijainnin.
5. Paikannustulos palautetaan päätelaitteelle esimerkiksi kuvan muodossa.

5.3.3 Päätelaitte

Päätelaitteen tehtävänä on signaalien voimakkuuksien mittaus kaikista kuultavista tukiasemista. Tukiasemien havaitsemista varten päätelaitteen langaton verkkorajapinta asetetaan tilaan, jolloin kaikkien verkossa liikkuvien kehysten kuunteleminen on mahdollista. Monessa yhteydessä tästä tilasta käytetään termiä ”promiscuous mode” ja tähän tilaan siirtyminen on mahdollista tätä tarkoitusta varten muokattua verkkoajuria käyttämällä.

Kuuntelutilassa päätelaitte käy läpi jokaisen radiokanavan ja odottaa mahdollisia kehyksiä saapuvaksi. Erityisesti päätelaitteen ohjelma kiinnittää huomiota beacon-kehyksiin, joita tukiasemat lähettävät tietyin väliajoin (kts. kappale 3.4.5 MAC-kehysten muoto). Kehyksen tarkoituksena on kertoa päätelaitteille tukiaseman asetuksista, joita päätelaitteet tarvitsevat yhteyden muodostamiseksi. Normaalikäytännön mukaisesti päätelaitteet huomioivat vain ne beacon-kehukset, joiden verkkotunniste (SSID) vastaa päätelaitteelle asetettua tunnistetta ja tekevät vastaavien tukiasemien välillä arvion siitä, mistä tukiasemasta lähetetty signaali on voimakkain. Kuuntelutilassa sen sijaan on mahdollista tulkita kaikkien kehysten sisällöt ja samalla lukea fyysiseltä kerrokselta kunkin kehysten vastaanoton aikana laskettu signaalin voimakkuus. Usein on kuitenkin tarkoituksen mukaista kuunnella vain tietyn verkkotunnisteen sisältäviä kehyksiä, jotta paikannusta eivät pääse häiritsemään

vieraiden verkkojen kehykset. Valinta voidaan suorittaa tulkitsemalla tarkemmin beacon-kehyksen SSID-kenttää.

Kappaleessa 3.2.2 käsitellyn kanavien ylikuulumisilmiön vuoksi päätelaite saattaa vastaanottaa beacon-kehyksiä kanavilla, joilla tukiasemaa ei oikeasti ole. Sekaannusten välttämiseksi päätelaitteen ohjelma lukee kehyksestä kentän ”DS-parametri”, jonka sisällöksi tukiasemat asettavat varsinaisen lähetyskanavansa. Mikäli kehyksen sisältämä kanavanumero ei ole sama kuin kuunneltavan kanavan kanavanumero, päätelaitteen ohjelma hylkää kehyksen ja jatkaa kuuntelua.

Tukiasemien vakioasetusten mukaan beacon-kehyksiä lähetetään 100 ms:n välein, joten vähintään tässä ajassa päätelaite vastaanottaa ensimmäisen kehyksen, mikäli kuunneltavalla kanavalla kehyksiä lähetetään. Kun ensimmäinen verkkotunnisteen ja kanavanumeron suhteen hyväksyttävä kehys uudella kanavalla vastaanotetaan, vaihdetaan kuuntelutilan ajastusta siten, että samalta kanavalta ehditään vastaanottaa useita kehyksiä. Tarkoituksena on tasata signaalin voimakkuusarvoa muodostamalla lopullinen arvo useiden kehysten aikana mitattujen signaalitasojen keskiarvosta. Fyysisen kerroksen tuottamat signaalin voimakkuusarvot vaihtelevat hetkittäin suhteellisen voimakkaasti ja siksi keskiarvon laskenta on hyödyllinen toimenpide, jolla voidaan vähentää yksittäisten virheiden vaikutusta. Lopuksi valituiksi tulleista kehyksistä listataan kehyksen lähettäneen tukiaseman laitteisto-osoite sekä signaalin voimakkuusarvo ja mittaustulosten yhteenveto lähetetään palvelimelle.

5.3.4 Palvelin

Paikannusjärjestelmässä palvelimen tehtävänä on suorittaa varsinainen paikan määrittely. Palvelimen vastaanotettua päätelaitteen mittaustulokset, se valitsee näistä merkittävimmät eli tulokset, joissa signaalin voimakkuus on mahdollisimman suuri. Tämän jälkeen palvelin suorittaa tietokantahaun käyttäen parametreinaan voimakkaimmin kuuluneiden tukiasemien laitteisto-osoitteita.

Tietokantahaku palauttaa listauksen, jossa näkyvät parametreina syötettyjen tukiasemien alustusvaiheessa mitatut signaalien voimakkuudet (Taulukko 5). Jokainen listauksen rivi vastaa tiettyä paikkaa kartalla.

Taulukko 5: Tietokantahaun tulos

Paikkakoordinaatit		Tukiasemat ja niiden signaalien voimakkuudet		
X	Y	Asema T1	...	Asema Tn
x_1	y_1	$T1_1$...	Tn_1
...
x_m	y_m	$T1_m$...	Tn_m

Palvelin valitsee listauksesta rivin, joka voimakkuusarvojen mukaan vastaa parhaiten päätelaitteen lähettämiä mittauksia. Vastaavuus arvojen välillä lasketaan kaavalla 4, joka on johdettu L_1 -metrisestä arvojoukkojen suorakulmaisen etäisyyden kaavasta [Pen98]. Ensín jokaiselle riville lasketaan voimakkuusarvojen poikkeama päätelaitteen lähettämiin arvoihin verrattuna. Poikkeamia verrataan keskenään ja pienimmän arvon tuottanut rivi valitaan vastaamaan päätelaitteen sijaintia. Samalta riviltä voidaan lukea päätelaitteen sijainnin määrittelevät x- ja y-koordinaatit.

$$M = \text{MIN} \left(\sum_{t=1}^{t_{\max}} |S(t, r) - S_p(t)| \right), r = 1, \dots, r_{\max} \quad (4)$$

missä

- M = pienin poikkeama päätelaitteen arvoista
- $S(t, r)$ = tietokannasta luettu signaalin voimakkuus
- $S_p(t)$ = päätelaitteen mittaama signaalin voimakkuus
- t = indeksi tukiasemajoukkoon ylärajanaan t_{\max}
- r = indeksi tietokannan riveihin ylärajanaan r_{\max}

Esimerkiksi taulukon 5 arvoja käyttäen summalausekkeesta muodostuu $(|T1_1 - T1_p| + |T2_1 - T2_p| + \dots + |Tn_1 - Tn_p|)$, jossa alaindeksi p viittaa päätelaitteelta vastaanotettuun arvoon. Samalla tavoin muodostetaan lausekkeet myös muille riveille.

Koordinaattien mukaan asiakkaalle voidaan luoda esimerkiksi karttakuva, josta sijainti ilmenee havainnollisesti. Koordinaatit voidaan myös lähettää eteenpäin toisen palvelun hyödynnettäviksi.

5.3.5 Tietokanta

Paikannusjärjestelmän tietokanta koostuu yhdestä taulusta, jossa kenttien lukumäärään vaikuttaa paikannuksessa käytettävien tukiasemien määrä. Jokaiselle tukiasemalle on oma kenttensä ja näiden lisäksi tauluun talletetaan x ja y -koordinaatit vakiokenttiinsä. Taulun rakenne on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6: Tietokannan rakenne

Nimi	Pituus (tavuissa)	Vakioarvo
x-koordinaatti	3	0
y-koordinaatti	3	0
Tukiasema T1	3	NULL
...
Tukiasema Tn	3	NULL

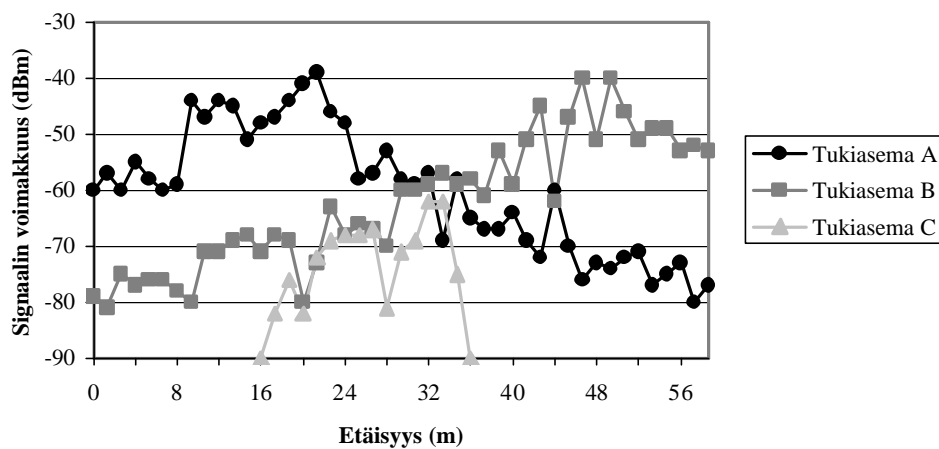
Testiverkossa on käytössä kolme tukiasemaa, joten taulu sisältää viisi kenttää: x - ja y -koordinaattikentät sekä tukiasemakentät T1, T2 ja T3.

5.3.6 Paikannustarkkuus

Paikannuksen tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat havaittavien tukiasemien määrä, satunnaiset vaihtelut päätelaitteen mitaamissa signaalitasoissa sekä alustusvaiheessa suoritettujen kartoitusten mittauspisteiden tiheys.

Päätelaitteen havaitsemien signaalitasojen suhteellisen voimakkaan vaihtelun havainnollistamiseksi suoritettiin paikannusjärjestelmään kuulumaton signaalitasojen mittaus. Mittaus suoritettiin päätelaitteen avulla samalla alueella, jossa paikannusta testattiin. Kuvassa 22 näkyvät päätelaitteen vastaanottamat signaalitasot tukiasemista A, B ja C. Mittauspisteet jakautuvat tasaisesti koko käytävän pituudelle alkaen rakennuksen vasemman siiven päädyistä.

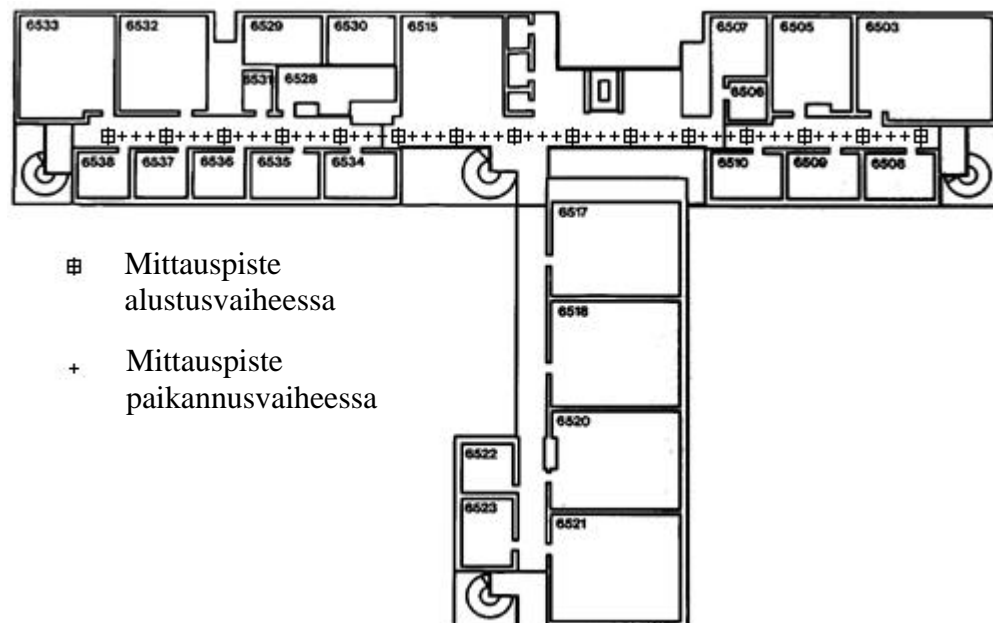
Kappaleessa 5.1 kuvassa 16 esitettyjen tukiasemien kuuluvuusalueiden mukaisesti tämäkin testi osoittaa tukiasemien A ja B kuuluvan rakennuksen kummassakin siivessä. Heikoimmillaan signaalit vaime nevat tasolle -81 dBm ja voimakkain mitattu signaali saavuttaa tason -39 dBm. Kahden vierekkäisen pisteen välinen suurin ero on 17 dBm. Tukiasemasta C vastaanotetaan signaali vain mitta-alueen keskivaiheilla 20 metrin matkalla. Muualla mitta-alueen sisällä tukiasema ei ole kuultavissa.



Kuva 22: Signaalien voimakkuudet suhteessa etäisyyteen käytävän vasemmasta päädyistä alkaen

Voimakas signaalitasojen vaihtelu mittauspisteiden välillä on seurausta WLAN-tekniikan käyttämän aaltoalueen herkkyydestä radioaaltojen etenemistä häiritsevien tekijöiden suhteen. Etenkin monitie-eteneminen voi aiheuttaa äkillisiä vaihteluita signaalitasoissa jo puolen aallonpituuden mittaisella matkalla. Radiotien ominaisuuksia on käsitelty kappaleessa 3.3.

Testiverkon osalta alustusvaiheessa suoritettiin 15 kappaletta mittauksia ja mittauspisteiden välimatkaksi muodostui neljä metriä. Paikannusvaiheessa testit suoritettiin yhden metrin välein, joten testipisteitä oli 57. Teoriassa neljän metrin väli mittauspisteissä mahdollistaa paikannuksen ± 2 metrin tarkkuudella. Sekä alustus- että paikannusvaiheessa päätelaite kuunteli tukiasemien kanavia yhden sekunnin ajan ehtien vastaanottaa jokaisesta tukiasemasta 10 beacon-kehystä. Mittaustilanteessa päätelaitteen asento käytävään nähden pysyi samana. Kummankin vaiheen mittauspisteet on sijoitettu pohjapiirrokseen kuvassa 23.



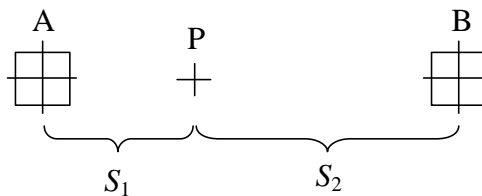
Kuva 23: Paikannuksen mittauspisteet

Testejä suoritettiin kaksi kappaletta. Ensimmäisessä testissä paikannustulokseksi valittiin suoraan kaavan 4 mukaisesti pienimmän poikkeaman tuottanut alustusvaiheen mittauspiste. Paikannustarkkuuden parantamiseksi toisessa testissä päätelaitteen mittaustuloksia verrattiin samanaikaisesti kahteen mittauspisteeseen, jotka tuottivat pienimmät poikkeamat M_1 ja M_2 . Arvio paikasta muodostettiin laskemalla poikkeamien suhde yhteenlaskettuun poikkeamaan nähden kaavoilla 5 ja 6.

$$S_1 = \frac{M_1}{M_1 + M_2} \quad (5)$$

$$S_2 = \frac{M_2}{M_1 + M_2} \quad (6)$$

Mittauspisteiden vaikutusta paikka-arviioon painotettiin suhdelukujen S_1 ja S_2 mukaisesti (Kuva 24). Kuvassa mittauspisteen A poikkeama on M_1 ja pisteen B poikkeama on M_2 . Paikannustulos P asettuu lähemmäs mittauspistettä A.



Kuva 24: Paikannus kahden mittauspisteen perusteella

Osassa testitapauksista poikkeamien M_1 ja M_2 avulla valitut mittauspisteet eivät olleet fyysisesti vierekkäisiä pisteitä, vaan eroa näiden välillä saattoi olla useiden pisteiden verran. Näissä tapauksissa toisen pisteen huomioiminen voi pahimmassa tapauksessa heikentää paikannustarkkuutta, mikäli tämä piste siirtää paikka-arviota kauas ensimmäisen pisteen tuottamasta arviosta. Tästä johtuen algoritmiin on lisätty taulukossa 7 esitetyt kokeellisesti hyväksi havaitut painotuskertoimet. Pisteiden A ja B välisen eron suuruudesta riippuen taulukosta valitaan kerroin, jolla suhdeluku S_1

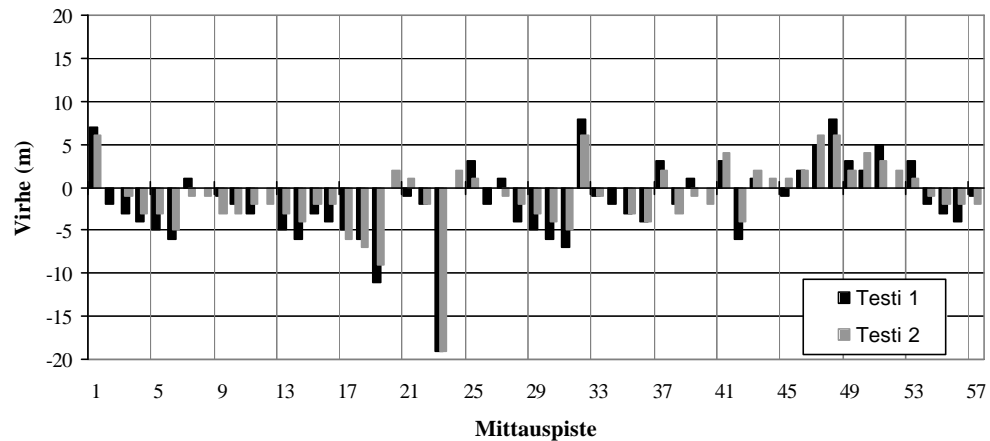
kerrotaan. Tällöin pisteen B vaikutus paikannustulokseen vähenee pisteiden eron kasvaessa.

Taulukko 7: Mittauspisteiden eron vaikutus painotuskertoimeen

Ero pisteiden välillä	Painotuskerroin
1	1
2	0,5
> 2	0

Pisteiden eron ollessa pienimmillään yksi, ovat pisteet fyysisesti vierekkäisiä ja todellisuudessa niiden välinen etäisyys on noin neljä metriä. Taulukon mukaan vierekkäisten pisteiden ollessa kyseessä, ei painotuskertoimella vaikuteta millään tavoin suhdelukuun S_1 . Kun ero pisteiden välillä kasvaa kahteen yksikköön, saadaan taulukosta suhdeluvun S_1 kertoimeksi 0,5. Tällöin kuvassa 24 paikannustulos sijoittuisi tarkasti pisteiden A ja P keskelle. Eron kasvaessa tätäkin suuremmaksi toista mittauspistettä ei huomioida paikannustuloksessa ollenkaan, joten paikannus tapahtuu vain pienimmän poikkeaman M_1 tuottaneen paikka-arvion pohjalta ja kuvassa 24 tuloksena olisi piste A.

Paikannusvaiheessa järjestelmän palauttamaa paikannustulosta verrattiin testin mittauspisteen sijaintiin ja näiden erotuksena laskettiin virhe-etäisyys jokaiselle mittauspisteelle. Testien tarkkuus on yksi metri ja tulokset mittauspisteittäin on kirjattu kuvaan 25. Kuvassa on sekä positiivisia että negatiivisia virhearvoja, joiden erona on virheen suunta todelliseen testipisteeseen nähden. Suuntaa tärkeämpää on kuitenkin tutkia virheiden suuruutta suunnasta välittämättä.



Kuva 25: Virheet mittauspisteittäin

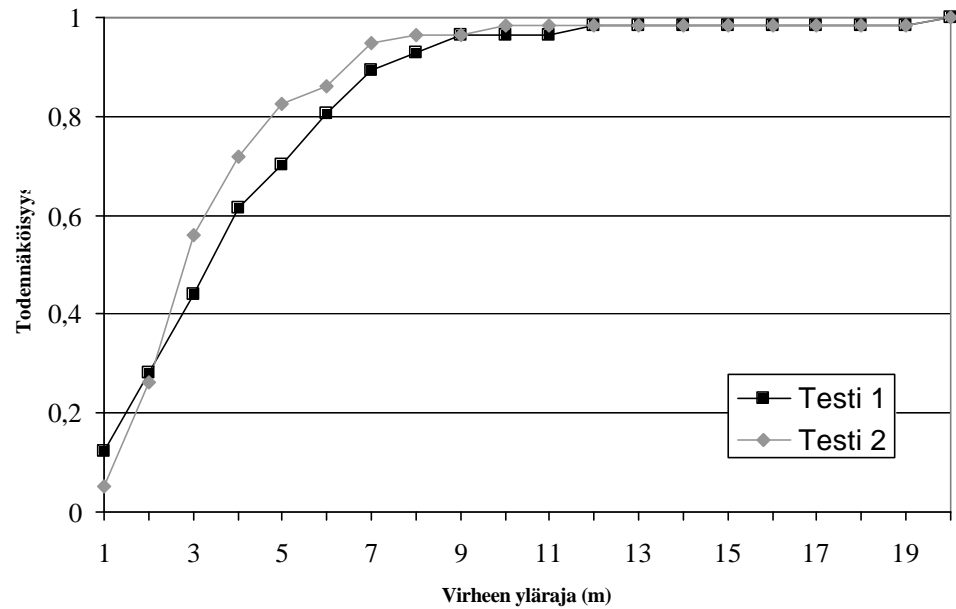
Testitulosten joukossa suurin absoluuttinen virhe oli 19 metriä. Tätä yksittäistä suhteellisen suurta virhettä lukuun ottamatta testitulokset pysyivät 11 metrin absoluuttisen virheen sisällä. Testi 2 paransi keskimääräistä paikannustarkkuutta yhdellä metrillä, vaikka osassa mittauspisteistä tarkkuus huononi. Taulukossa 7 esitettyjen painotuskertoimien mukaisesti uusittu algoritmi voi vaikuttaa paikannustulokseen enimmillään kaksi metriä. Oheisessa taulukossa 8 on listattuna muutamia virheiden esiintymistä kuvaavia tunnuslukuja kummankin testin osalta.

Taulukko 8: Paikannusvirheet suhteessa esiintymismäärään

Prosenttipiste	Testi 1, virheen yläraja (m)	Testi 2, virheen yläraja (m)
25 % fraktiili	2	2
50 % fraktiili	4	3
75 % fraktiili	6	5
90 % fraktiili	7,4	7

Paikannusvirheiden kertymäfunktio kuvassa 26 havainnollistaa hyvin virheiden esiintymistodennäköisyydet. Testissä 1 virheiden todennäköisyys kasvaa seitsemän

metrin ylärajaan asti lähes lineaarisesti, minkä jälkeen kasvu hidastuu voimakkaasti virheen ylärajan kasvaessa 20 metriin. Testissä 2 parannetun algoritmin vaikutus näkyy parhaiten virhealueella kolmesta kahdeksaan metriin.



Kuva 26: Paikannusvirheiden kertymäfunktio

6 PÄÄTELMÄT

Tässä diplomityössä tutkittiin mahdollisuuksia hyödyntää solupaikannusta ja signaalin voimakkuuteen perustuvaa paikannusmenetelmää IEEE 802.11 –standardin mukaisessa WLAN-verkossa. Kummankin menetelmän käyttö todettiin mahdolliseksi ilman verkon normaaliin kokoonpanoon kuulumatonta laitteistoa.

Työssä toteutetun solupaikannusjärjestelmän tarkkuudeksi testiympäristössä mitattiin ± 50 metriä. Huomioitavaa on, että tarkkuus on pitkälti riippuvainen käyttöympäristöstä, joka määrää tukiasemien kuuluvuusalueen koon. Solupaikannusta käyttävän paikannuspalvelun päälle kehitetty käyttöliittymä toimintoinen on hyvä esimerkki solupaikannuksen käyttökohteesta. Kyseiselle palvelulle solupaikannuksen tarkkuus on riittävä ja paikannusjärjestelmän käyttöönotto on täten helppoa verrattuna signaalin voimakkuuteen perustuvaan menetelmään, jossa järjestelmän alustusvaiheen suorittaminen on välttämätöntä.

Työn toinen paikannusmenetelmä perustui päätelaitteella mitattujen signaalitasojen vertaamiseen tietokannan vastaaviin arvoihin nähden. Menetelmä koostui alustus- sekä paikannusvaiheesta. Alustusvaiheessa tietokantaan kerättiin signaaliarvoja paikannusalueelta ennalta määrätystä mittauspisteistä, joita testissä oli 15 kappaletta. Paikannusvaiheessa mittauksia suoritettiin 57 mittauspisteessä ja mitattuja arvoja verrattiin alustusvaiheen mittaustuloksiin. Ensimmäisessä testissä paikannustarkkuuden mediaaniksi laskettiin ± 4 metriä. Toinen testi osoitti tarkkuuden olevan parannettavissa muokkaamalla järjestelmän sisäistä algoritmia siten, että paikannuksessa huomioidaan paikka-arviot kahdesta alustusvaiheen mittauspisteestä. Tällöin paikannustarkkuuden mediaani parani metrillä ollen ± 3 metriä. Sovellettaessa menetelmää käytännössä on huomioitava suurempien virheiden esiintymisen mahdollisuus. Testin kaikkien mittausten joukosta yksi antoi vastauksen, jonka absoluuttinen virhe oli 19 metriä.

Signaalitasojen vertailuun perustuva paikannusmenetelmä toteutti sille asetetun tavoitteen parantaa solupaikannuksella saavutettavaa tarkkuutta. Moninkertaisesti tarkempaan menetelmään signaalitasopaikannus luo uusia mahdollisuuksia sitä

hyödyntäville palveluille. Testiympäristössä paikannus onnistuisi vähintäänkin huoneiden tarkkuudella tällä menetelmällä. Käyttökohteita rajaavat menetelmän asettamat vaatimukset päätelaitteille. Laitteiden on kyettävä suorittamaan signaalitasojen mittaus ja tietojen lähettäminen palvelimelle. Työssä menetelmän vaatima päätelaitteen ohjelmisto toteutettiin vain Linux-käyttöjärjestelmälle.

LÄHTEET

- [Ans99] ANSI/IEEE Std 802.11, 1999 Edition, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 1999, ISBN 0-7381-1658-0
- [Bul93] Bultitude, Robert J. C, The Dependence of Indoor Radio Channel Multipath Characteristics on Transmit/Receive Ranges, IEEE Journal on Selected Areas in Communications Vol. 11 Issue 7, 1993, ISSN 0733-8716
- [Bah00a] Bahl, Padmanabhan, RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system, INFOCOM 2000, Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. Volume 2, 2000, ISBN 0-7803-5880-5
- [Bah00b] Bahl, Padmanabhan, Enhancements to the RADAR User Location and Tracking System, [verkkodokumentti], Microsoft Research [viitattu 31.8.2001]
Saataavissa: <http://research.microsoft.com/~bahl/Papers/Pdf/radar.pdf>
- [Cap02] Capkun, S., Hamdi, M., Hubaux, J.P., GPS-free Positioning in Mobile Ad-Hoc Networks", The Journal of Cluster Computing, Issue 2, April 2002 ISSN 1386-7857
- [Eka01] Ekahau Inc., Ekahau Positioning Engine, [viitattu 11.2.2002]
Saataavissa: <http://www.ekahau.com>
- [Fol90] Foley, James D., Computer graphics principles and practice, 2. edition, Reading (MA) Addison-Wesley, 1990, ISBN 0-201-12110-7

- [Gei99] Geier, Jim, Wireless LANs, Macmillan Technical Publishing, 1999, ISBN 1-57870-081-7
- [Has93] Hashemi, H., The Indoor Radio Propagation Channel, Proceedings of the IEEE, Vol. 81, Issue 7, 1993, ISSN 0018-9219
- [Hel01] Helén, M., Latvala, J., Ikonen, H., Niittylahti, J., Using Calibration in RSSI-based Location Tracking System, Proceedings of the 5th World Multiconference on Circuits, Systems, Communications & Computers, 2001
- [Ikk01] Ikkelä, Kalle, Local services in a fourth generation mobile network, Master's Thesis, LUT, 2001
- [Jam99] Jami, I., Ali, M., Ormondroyd, R.F., Comparison of methods of locating and tracking cellular mobiles, IEEE Colloquium on Novel Methods on Location and Tracking of Cellular Mobiles and Their System Applications, 1999/046
- [Jäp01] Jäppinen, Pekka, Bluetooth wireless technology based guidance system, Master's Thesis, LUT, 2001
- [Kam00] Kamerman, A. Net throughput with IEEE 802.11 wireless LANs, Wireless Communications and Networking Conference, Volume 2 2000, ISBN 0-7803-6596-8
- [Khu98] Khurana, S. Effect of hidden terminals on the performance of IEEE 802.11 MAC protocol, Proceedings of 23rd Annual Conference on Local Computer Networks, 1998, ISBN 0-8186-8810-6
- [Lan01] Lansford, J. Wi-Fi (802.11b) and Bluetooth: Enabling Coexistence, IEEE Network, Volume 15, Issue 5, 2001, ISSN 0890-8044

- [Lar98] Larijani, L. Casey, GPS for everyone, American Interface Corporation, 1998, ISBN 0-9659667-5-5
- [Lat00] Latvala, J., Syrjärinne, J., Ikonen, H., Niittylahti, J., Evaluation of RSSI-based Human Tracking, Proceedings of the 2000 European Signal Processing Conference, 2000
- [Lat99] Latvala, J., Syrjärinne J., Niemi, S., Niittylahti, J., Patient Tracking in a Hospital Environment Using Wireless Stations and Extended Kalman Filtering, Proceedings of 1999 Middle East Conference on Networking, 1999
- [Lin96] Lindell, Ismo, Radioaaltojen eteneminen, Otatiето, 1996, ISBN 951-672-227-X
- [Mic02] Micsom Oy, Micsom Zone Server, [viitattu 11.2.2002]
Saatavissa: <http://www.micsom.fi>
- [Oha99] O'Hara, Bob, Petrick, Al, IEEE 802.11 Handbook: A Designer's Companion, Standards Information Network, IEEE Press, 1999, ISBN 0-7381-1857-5
- [Pen98] Penttonen, Martti, Johdatus algoritmien suunnitteluun ja analysointiin, Hakapaino OY, 1998, ISBN 951-672-249-0
- [RFC768] User Datagram Protocol, [verkkodokumentti], [viitattu 25.1.2002]
Saatavissa: <ftp://ftp.ietf.org/rfc/rfc0791.txt>
- [RFC791] Internet Protocol, [verkkodokumentti], [viitattu 25.1.2002]
Saatavissa: <ftp://ftp.ietf.org/rfc/rfc0768.txt>

- [RFC1157] Simple Network Management Protocol, [verkkodokumentti], [viitattu 12.2.2002]
Saatavissa: <ftp://ftp.ietf.org/rfc/rfc1157.txt>
- [RFC2138] Remote Authentication Dial In User Service, [verkkodokumentti], [viitattu 12.2.2002]
Saatavissa: <ftp://ftp.ietf.org/rfc/rfc2138.txt>
- [RFC2616] Hypertext Transfer Protocol, [verkkodokumentti], [viitattu 14.2.2002]
Saatavissa: <ftp://ftp.ietf.org/rfc/rfc2616.txt>
- [Sei92] Seidel, Rappaport, 914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings, IEEE Transactions on antennas and propagation, Volume 40, No. 2, 1992, ISSN 0018-926X
- [Sma00] Small, Smailagic, Siewiorek, Determining User Location For Context Aware Computing Through the Use of a Wireless LAN Infrastructure [verkkodokumentti], Carnegie Mellon University, Project Aura, December 2000 [viitattu 30.8.2001]
Saatavissa: <http://www.cs.cmu.edu/~aura/docdir/small00.pdf>
- [Syr01] Syrjärinne, Jari, Studies of Modern Technologies for Personal Positioning, Doctoral Thesis, TUT, Publications 319, 2001
- [Xin00] Xinrong, Li, Pahlavan, K., Latva-aho, M., Ylianttila, M., Comparison of indoor geolocation methods in DSSS and OFDM wireless LAN systems, 52nd IEEE Vehicular Technology Conference, 2000, Vol. 6, ISBN 0-7803-6507-0
- [Xml02] XML-RPC Home Page, [verkkodokumentti], [viitattu 14.2.2002]
Saatavissa: <http://www.xmlrpc.com>