

Jonne Bäck

Reaaliaikaisen sisätilapaikannuksen teknologia- selvitys

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikan
koulutusohjelma

Insinöörityö

4.9.2017

Tekijä Otsikko	Jonne Bäck Reaaliaikaisen sisätilapaikannuksen teknologiaselvitys
Sivumäärä Aika	41 sivua + 1 liite 4.9.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	Ryhmäpäällikkö Aki Väänänen Lehtori Jarmo Tapio
<p>Insinööriyö on tehty Granlund Oy:n toimeksiantona. Työn tarkoituksena oli tutkia reaaliaikaiseen sisätilapaikannukseen käytettävien tekniikoiden suorituskykyä ja toimintaperiaatteita, selvittää talotekniikkasuunnittelussa huomioitavia asioita ja arvioida paikannusjärjestelmien kustannuksia.</p> <p>Insinööriyön kirjoitushetkellä sisätilapaikannustekniikoiden kirjo on laaja ja alan markkinaosuudesta kilpailee yli 200 yritystä. Tutkimuksen pääpaino oli erilaisissa reaaliaikaisissa radioaalloilla toimivissa tekniikoissa, jotka hyödyntävät esimerkiksi WLAN-verkkoja tai Bluetooth-majakoita paikannuksessaan.</p> <p>Insinööriyö tehtiin pääasiassa aiheen teoreettisen tarkastelun pohjalta. Lähdemateriaalina on käytetty alaan liittyvää kirjallisuutta, muita opinnäytetöitä ja väitöskirjoja sekä asiantuntijoiden haastatteluja järjestelmän valmistajilta.</p> <p>Työssä todettiin yksittäisen radioaaltoja hyödyntävän tekniikan olevan usein riittämätön huonetasoista tai tarkempaa paikannusta vaadittaessa. Tällöin järjestelmää voidaan täydentää esimerkiksi infrapunasäteilyä tai ultraääniaaltoja hyödyntävillä lisäpaikantimilla.</p> <p>Työn perusteella kustannustehokkaaksi ratkaisuksi päättyi WLAN-tukiasemiin tai Bluetooth low energy -majakoihin perustuva paikannus kattavaa paikannusjärjestelmää hankittaessa. Yksittäisistä tekniikoista parhaaseen paikannustarkkuuteen ylittää ultra wideband -tekniikka.</p>	
Avainsanat	Sisätilapaikannus, WLAN-lähiverkko, Bluetooth low energy, radiotaajuinen etätunnistus, UWB-radioverkkoteknologia

Author Title	Jonne Bäck An Evaluation of Real-Time Indoor Positioning Technologies
Number of Pages Date	41 pages + 1 appendix 4 September 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructor(s)	Aki Väänänen, Group Manager Jarmo Tapio, Senior Lecturer
<p>This study was commissioned by Granlund Oy. The study surveys functional principles and performance of various methods used for real time positioning indoors, compiles the necessary background information needed for the ICT design of such system and attempts to estimate the average cost of positioning systems.</p> <p>More than 200 companies are competing for a market share in the field of indoor positioning. This study emphasizes techniques utilizing radio waves for location tracking, such as WLAN- or Bluetooth positioning.</p> <p>The study was made primarily by theoretical survey of the subject. Positioning literature, graduation works, dissertations and consultant interviews were used as source material.</p> <p>It was established that in most scenarios no single radio waves utilizing method is capable for precise indoor positioning. To achieve room tier accuracy (or better), the system may be equipped with additional positioning devices which utilize e.g. infrared radiation or ultrasound waves.</p> <p>According to this study, positioning systems based on WLAN access points or Bluetooth Low Energy beacons are cost-efficient solutions for a comprehensive real time location tracking system. Ultra wideband technology offers the best tracking accuracy as a singular positioning method.</p>	
Keywords	Indoor positioning, real time locating system, wireless local area network, Bluetooth Low Energy, radio frequency identification, ultra wideband

Sisällys

Lyhenteet ja käsitteet

1	Johdanto	1
2	Paikannusjärjestelmän yleisten vaatimusten määrittely	3
3	Paikannusjärjestelmän laitteisto	6
4	Paikannuksen teoriaa	7
5	Paikannussignaalin käsittely- ja laskentamenetelmät	11
6	Radioaalloilla toimivat paikannustekniikat	14
6.1	WLAN-paikannus	14
6.2	Bluetooth Low Energy -paikannus	17
6.3	Ultra Wideband -paikannus	18
6.4	RFID-paikannus	19
6.5	Zigbee	20
7	Muita paikannustekniikoita	21
7.1	IR-säteilyyn perustuva paikannus	22
7.2	Näkyvään valoon perustuva paikannus	22
7.3	Magneettinen paikannus	23
7.4	Ultraäänipaikannus	23
8	Kaupalliset paikannusjärjestelmät	24
8.1	Stanley Healthcare Aeroscout	25
8.2	Ekahau RTLS	26
8.3	9Solutions RTLS	28
8.4	Quuppa Intelligent Location System	29
8.5	Kaltiot Smart Tracker	30
8.6	Zebra Dart UWB	30
8.7	Ubisense Dimension4	32
9	Tulokset	33

10	Yhteenveto	35
	Lähteet	37
	Liitteet	
	Liite 1. Paikannusjärjestelmien vertailutaulukko	

Lyhenteet ja käsitteet

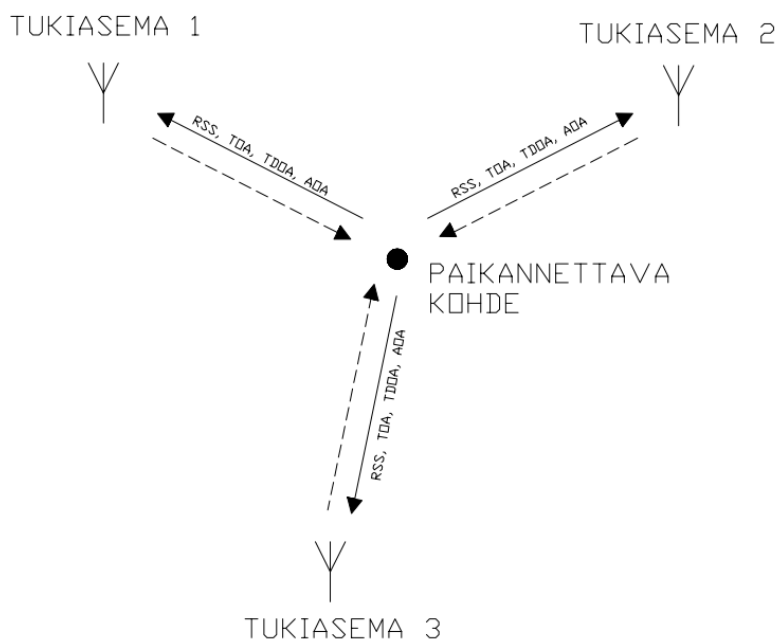
3G	Kolmannen sukupolven mobiiliverkkoteknologia.
5G	Viidennen sukupolven mobiiliverkkoteknologia.
AoA	Angle of Arrival. Signaalin tulokulmaan perustuva laskentamenetelmä.
BLE	Bluetooth Low Energy. Langaton lyhyen matkan liikiverkkotekniikka.
GDPR	General Data Protection Regulation. Euroopan Unionin 2016 voimaan astunut tietoturvasäädös.
GPS	Global Positioning System. Yhdysvaltain puolustusministeriön kehittämä ja rahoittama satelliittipaikannusjärjestelmä.
HF	High Frequency. Suuret taajuudet, 3–30 MHz.
ICT	Information and Communication Technology.
IR	Infrapunasäteily. Sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituus on suurempi kuin näkyvän valon, mutta pienempi kuin mikroaaltojen.
LED	Light Emitting Diode. Puolijohdekomponentti, joka säteilee valoa, kun sen läpi johdetaan sähkövirta.
LF	Low Frequency. Pienet taajuudet, 30–300 kHz.
LOS	Line-of-sight. Suora näköyhteys lähettimen ja vastaanottimen välillä
NLOS	Non-line-of-sight. Epäsuora lähetin-vastaanotin -yhteys
QR-koodi	Quick Response-koodi. Kaksiulotteinen kuviokoodi.
RFID	Radio Frequency Identification. Radiotaajuudella toimiva menetelmä tiedon etälukuun ja tallentamiseen.

RSS	Received Signal Strength. Signaalinvoimakkuuteen perustuva laskentamenetelmä.
RTLS	Real Time Location System. Reaaliaikainen paikannusjärjestelmä.
SNR	Signal-to-noise –ratio. Signaali-kohinasuhde, jolla kuvataan hyötytehon ja kohinatehon suhdetta.
TDoA	Time Difference of Arrival. Signaalien aikaeroon perustuva laskentamenetelmä.
ToA	Time of Arrival. Signaalien lähtö-tuloaikaeroon perustuva laskentamenetelmä.
UHF	Ultra High Frequency. Taajuudet välillä 0,3–3 GHz.
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System. Kolmannen sukupolven matkapuhelinteknologia.
UWB	Ultra Wideband –tekniikka, jossa tieto lähetetään äärimmäisen lyhyinä ja pienitehoisina pulsseina hyvin leveälle taajuuskaistalle.
VHF	Very High Frequency. Hyvin suuret taajuudet, 30–300 MHz.
VLC	Visible Light Communication. Näkyvään valoon perustuva tiedonsiirtotekniikka.
WLAN	Wireless Local Area Network. Langaton lähiverkkotekniikka, jolla erilaiset verkkolaitteet voidaan yhdistää toisiinsa ilman kaapeleita.
WPAN	Wireless Personal Area Network. Tiedonsiirtoverkko, jossa henkilökohtaiset elektroniset laitteet voivat kommunikoida keskenään.

1 Johdanto

Insinööri työ on tehty Granlund Oy:n toimeksiantona, ja sen tavoitteena on tutkia erilaisia sisätilapaikannukseen soveltuvia tekniikoita ja teknologioita talotekniikkasuunnittelun tarpeet huomioiden. Työn keskeisiä tavoitteita on vertailla erilaisten sisätilapaikannukseen käytettävien tekniikoiden suorituskykyä, selvittää suunnittelun kannalta tärkeitä asioita ja arvioida paikannusjärjestelmän kustannuksia.

Paikannusprosessilla tarkoitetaan paikannuksen kohteen sijainnin arvioimista siihen soveltuvan menetelmän avulla. Kuva 1 havainnollistaa paikannuksessa käytettävää peruseriaatetta: liikkuvan tai staattisen kohteen sijaintia arvioidaan eri tukiasemien vastaanottamien signaalien perusteella hyödyntäen sopivaa signaalilaskentamenetelmää. Tarkan sijainnin selvittämiseksi vaaditaan vähintään kolme kiinteää pistettä, joiden kautta paikannettavan kohteen sijainti voidaan päätellä.



Kuva 1. Paikannuksen peruseriaate.

Sisätilapaikannuksen käyttökohteita ovat esimerkiksi potilaiden tai henkilökunnan paikallistaminen sairaaloissa tai muissa hoitolaitoksissa, laitteiden ja esineiden paikallistamisen teollisuusympäristössä tai sisätilanavigointi suurissa rakennuksissa. Yleisesti paikannus voidaan jakaa kahteen pääryhmään, ulkoalue- ja sisätilapaikannukseen. Tämä insinööri työ keskittyy näistä jälkimmäiseen.

Paikannuksen siirtyessä ulkoalueilta sisätiloihin, ulkona erinomaisesti toimivien GPS-satelliittien signaalit vaimenevat voimakkaasti, eikä niitä ei voida luotettavasti hyödyntää sisätilapaikannuksessa. Sisätilapaikannukseen jääkin käytettäväksi joukko aktiivisia (Real Time Location System, RTLS) ja passiivisia paikannustekniikoita, joista yksikään ei ole vakiintunut selkeästi parhaaksi vaihtoehdoksi. Sisätilapaikannusta suunniteltaessa on tilannekohtaisesti arvioitava kohteeseen sopiva tekniikka tai tekniikoiden joukko. Useimmat kaupalliset järjestelmät yhdistävätkin kahta tai useampaa tekniikkaa riittävän tarkan paikannuksen aikaansaamiseksi. [1, s. 9–10.]

Esimerkkinä työssä käsittelemättä jätettävästä passiivisesta paikannustekniikasta on taannoin Kauppakeskus Kampissa käytössä ollut QR-koodeihin perustuva tekniikka. Tässä järjestelmässä mobiililaitteella luettavat lattiaan liimatut kooditarrat ohjasivat navigoijan yhden tai useamman QR-koodin kautta haluttuun kohteeseen.

Tutkielma perehtyy RTLS-paikannusmenetelmiin, jotka nimensä mukaisesti suorittavat reaaliaikaista paikannusta ja ovat teoreettisesti aina tietoisia kohteensa sijainnista paikannettavassa ympäristössään. Nämä tekniikat voidaan jaotella niiden toimintatavan perusteella seitsemään eri alaryhmään:

- radioaaltoihin
- infrapunasäteilyyn
- ultraääneen
- magneettikenttiin
- näkyvään valoon
- kameran kuvantunnistukseen tai
- ihmiskorvalla kuultavaan ääneen perustuviin paikannustekniikoihin.

Insinööriyön pääpaino on erilaisissa radioaalloilla toimivissa järjestelmissä, joita voidaan jaotella vielä omiin alaryhmiinsä esimerkiksi käytettävän taajuuden tai tiedonsiirtoprotokollan mukaan. Työssä esitellään myös muita tekniikoita, jotka voivat täydentää radioaalloilla toimivia järjestelmiä.

Yritysesittely

Granlund Oy on Suomen johtava talotekniikkasuunnittelun, kiinteistö-, energia ja ympäristöasioiden konsultoinnin sekä kiinteistön ylläpidon ja energiatehokkuuden ohjelmistoratkaisujen asiantuntijakonserni. Granlund on perustettu vuonna 1960 ja yritys on nimetty perustajansa Olof Granlundin mukaan. Konsernissa työskentelee yli 700 asiantuntijaa ja pääkonttori sijaitsee Malmilla, Helsingissä.

Perinteisen sähkö- ja LVI-suunnittelun ohella yritys tarjoaa laajaa erikoisosaamista. Omat osastonsa löytyvät esimerkiksi valaistus-, sairaala-, tele- ja turva-, datakeskus- ja AV-suunnittelulle. Lisäksi yritys tarjoaa erilaisia Granlund PLUS –palveluita täydentämään peruspalvelukokonaisuutta. [2.]

2 Paikannusjärjestelmän yleisten vaatimusten määrittely

Sisätilapaikannusjärjestelmää suunniteltaessa huomioitavia asioita ovat järjestelmältä vaadittava paikannustarkkuus, käyttövarmuus, sisäpeittoalueen laajuus, sen myöhempi laajennettavuus ja liityntärajapinnat muihin järjestelmiin, hankinta- ja elinkaarikustannukset, järjestelmän tietoturvallisuus sekä sen huollettavuus. [3; 4, s. 10–11.]

Paikannustarkkuus

Tärkein määräävä tekijä on järjestelmältä vaadittava paikannustarkkuus. Karkeaan, esim. kerrostasoiseen paikannukseen voi riittää vain yksittäinen tekniikka ja pieni määrä laitteita, kun taas huonetasoiseen paikannukseen voidaan joutua yhdistelemään useita tekniikoita ja järjestelmän laitekoonpano saattaa laajentua.

Käyttövarmuus- ja kapasiteetti

Järjestelmän käyttövarmuuteen voivat vaikuttaa esim. dataliikenteen häiriöt, sähkönsyötön odottamaton katkeaminen ja suunnitellut määräaikaishuollot. Jos paikannustarve on toiminnan kannalta kriittinen, on tarpeen selvittää järjestelmäkomponenttien kahdenustarpeet ja varavoimansyöttöön liittyvät seikat.

Järjestelmän paikannuskapasiteetti on harvemmin rajoittava tekijä. Tyypillisessä käytössä lähetinten virkistystaajuus on suuri (> 1 Hz), eikä käytettävä taajuuskaista ruuhkaudu. Kapasiteettia on hyvä tarkastella erityisen suurissa kohteissa, suuressa määrässä tunnisteita tai hyvin nopeasti liikkuvissa paikannuskohteissa (< 1 Hz virkistystaajuus), jotta palvelun ja muiden samalla taajuuskaistalla olevien toimintojen käyttövarmuus säilyy.

Sisäpeittoalueen koko

Paikannusjärjestelmältä vaadittu sisäpeittoalue voi olla rakennuksen osa, rakennus kokonaisuudessaan tai useamman rakennuksen joukko. Sisäpeittoalueesta voi olla tarpeen myös rajata tiettyjä alueita järjestelmälle näkymättömäksi esim. henkilöiden intimitteettisuojan varmistamiseksi.

Jos vaadittuun paikannusalueeseen kuuluu ulkoalueita tai useita rakennuksia (esim. sairaalat, kampukset), käytettävä järjestelmän voi olla tarpeen hyödyntää myös GPS- ja mobiiliverkkopaikannusta saumattoman paikannuksen saavuttamiseksi.

Osa signaalinlaskentamenetelmistä kykenee paikantamaan vain tasokoordinaatistossa ja monikerroksista paikannusta vaadittaessa on syytä varmistaa käytettävän teknologian kyky erotella rakennuksen kerrokset toisistaan.

Laajennettavuus ja liityntärajapinnat muihin järjestelmiin

Järjestelmän laajennettavuusmahdollisuudet on hyvä kartoittaa tulevaisuuden kannalta. Onko järjestelmä yhteensopiva muiden valmistajien laitteiden kanssa, ja voidaanko samaa järjestelmää hyödyntää ja laajentaa esim. lisärakennuksien valmistuessa?

Järjestelmäintegraation kannalta on selvitettävä liityntärajapinnat muihin järjestelmiin, joita sijaintitiedolla halutaan ohjata. Esimerkiksi tavarataloympäristössä, voidaan asiakkaalle kohdentaa mainoksia ja tuoteinfoa heidän sijaintinsa perusteella.

Kustannukset

Järjestelmän kustannukset koostuvat toteutus- ja elinkaarikustannuksista. Toteutuskustannuksiin kuuluvat järjestelmän suunnittelu-, laitehankinta- ja asennuskulut. Elinkaari-kustannuksiin kuuluvat järjestelmän käyttämän energian hinta, mahdolliset lisenssimaksut sekä lähettimien akkujen uusiminen.

Osa työssä esitetyistä kaupallisista järjestelmistä perustuu kuukausi- ja lisenssihinnoitteluun, mikä mutkistaa järjestelmän kustannusten arviointia. Järjestelmän kuluttaman energian hinta ei ole yksiselitteinen, sillä samaa järjestelmää (esim. WLAN) voidaan käyttää myös muuhun tarkoitukseen. Käytetyn sähköenergian hinta on kuitenkin hyvin pieni osa järjestelmän kokonaiskustannuksista.

Tietoturvallisuus

Koska paikannusjärjestelmällä voidaan seurata yksilöiden liikkumista ja heistä saattaa olla henkilökohtaisia tietoja palvelimella, on järjestelmä myös suojattava riittävällä tasolla mahdollisten tietomurtojen varalta. Kaikista henkilörekistereistä on laadittava rekisteriseloste, josta ilmenee tietojen käsittelystä vastaava rekisterinpitäjä, rekisterin sisältämät henkilötiedot, tiedonsuojauksen periaatteet, ja minne tietoja luovutetaan.

EU:n uusi tietosuojasetus (General Data Protection Regulation, GDPR) astui voimaan toukokuussa 2016 kahden vuoden siirtymäajalla, ja vuoden 2018 toisella neljänneksellä siitä tulee velvoittava. Asetuksen mukaan kuluttajan seurantaan vaaditaan heidän suostumuksena. Työntekijän seurantaan riittää laillinen peruste, kuten työntekijöiden turvallisuuden varmistaminen tai resurssien ohjaaminen oikeaan paikkaan. Mikäli paikannus kohdistuu välittömästi työntekijään (esim. matkapuhelimen tai henkilökohtaisen tunnisteen avulla), tulee tähän tietosuojavaltuutetun tulkinnan mukaan olla työntekijän suostumus. Työntekijän omaehtoista paikannuksen poiskytkentämahdollisuutta suositellaan myös, silloin kun laitetta voidaan käyttää luvallisesti työajan ulkopuolella. [5, 6.]

Järjestelmän huollettavuus

Järjestelmän huollettavuusnäkökohdat liittyvät erityisesti langattomien lähettimien ja vastaanottimien akkuihin. Joissain järjestelmissä laitteiden akut ja paristot voi loppukäyttäjä vaihtaa itse, toisissa järjestelmän toimittaja suorittaa niiden vaihdon ja joissain järjestelmissä koko tunniste joudutaan vaihtamaan uuteen sen käyttöiän päätyttyä. Myös käyttäjä voi ladata itse akkuja joissain laitemalleissa.

3 Paikannusjärjestelmän laitteisto

Paikannusjärjestelmän tekninen laitteisto koostuu paikannustavasta riippumatta vähintään seuraavasta kokoonpanosta (kuva 2):

- *Lähetin* (tunniste, tag) lähettää paikannussignaalin asetetun väliajoin ja käyttäjän pyynnöstä. Paikannuskäytössä lähetin on käytännössä aina aktiivinen, eli se on varustettu akulla tai paristolla, jonka varaus heikkenee ajan myötä. Tunnisteiden virkistystaajuutta (intervalli, kuinka usein paikannuspulssi lähetetään) voidaan usein ohjelmoida käyttötarpeen mukaan, ja harvemmin lähetetty pulssi mahdollistaa pidempiaikaisen akunkeston. Virkistystaajuus voidaan säätää kohteen oletetun etenemisnopeuden perusteella sopivaksi.
- *Vastaanotin* (esim. WLAN-tukiasema, BLE-majakka, UWB-vastaanotin tai RFID-lukija) vastaanottaa lähettimen tuottaman signaalipulssin, ja ohjaa sen paikannukseen käytettävälle laskentamootorille. Tämän vastaanotetun datan laskennalla tuotetaan paikannuspäätelmiä. Nimestään huolimatta vastaanottimet myös lähettävät signaaleja (eng. transceiver).
- *Kaapelointi* vastaanotinten ja keskuslaitteiden välillä. Poikkeuksena esim. magneettikenttiin perustuva järjestelmä tai Bluetooth-paikannusjärjestelmät, joiden toiminta voi tapahtua myös ilman kaapeloitua vastaanotininfrastruktuuria.
- *Palvelin/tietokone*. Vastaanottimien keräämä data viedään palvelimella sijaitsevalle paikannusmootorille, joka lopulta suorittaa laskenta-algoritmien avulla päätelmän kohteen sijainnista.

- *Paikannusmoottori* suorittaa laskutoimitukset vastaanottimien keräämän datan perusteella ja pääättelee paikannettavan kohteen sijainnin erilaisten laskenta-algoritmien avulla. Eräissä kaupallisissa järjestelmissä palveluntarjoajilla on oma pilvipalvelunsa, jossa kaikki laskenta suoritetaan. Tällöin paikallista palvelinta ja ohjelmistoa ei tarvita.
- *Paikannusohjelmisto* visualisoi paikannustuloksen rakennuksen pohjakuvan avulla ja suorittaa muita toimintoja, kuten tunnisteen hallinnoinnin ja erilaiset haut ja hälytykset.

Solution Components:



Kuva 2. Paikannuksen peruslaitteisto [7].

4 Paikannuksen teoriaa

Sisätilapaikannusjärjestelmää suunniteltaessa on tiedostettava ympäristön haasteet ja vaikutukset radiosignaalin etenemiseen. Radioaallot ovat 3 Hz–300 GHz taajuusalueella olevaa sähkömagneettista säteilyä, joka etenee tyhjiössä valonnopeudella. Väliaineissa, kuten ilmassa sen etenemisnopeus riippuu taajuudesta. [8.]

Rakennettu ympäristö vaikuttaa eteneviin signaaleihin eri tavoin kuin vapaa ilmatila. Vapaassa tilassa radiosignaali etenee hyvin ja siihen kohdistuu vain ilmasta johtuvaa vaimennusta. Rakennetussa ympäristössä käytetyt rakennusmateriaalit, pinnoitteet ja pinnan geometrinen muoto vaikuttavat langattomien signaalien etenemiseen vaimentamalla, heijastamalla, taittamalla ja siroamalla niitä.

Jos epäsuorasti siirtyvät radiosignaalit ovat samassa vaiheessa pääsignaalin kanssa, voivat ne vahvistaa sitä. Erivaiheiset heijastukset taas voivat heikentää vastaanottimelle

saapuvaa signaalinvoimakkuutta. Samaan pisteeseen saapuvat vastakkaisvaiheiset aallokko kumoavat toisensa, aiheuttaen paikallisen nollakohdan, jolla informaatiota ei kulje. Suoralla lähettimen ja vastaanottimen välisellä näköyhteydellä (Line-of-sight, LOS) saavutetaan parempi tarkkuus kuin epäsuoralla tai rakenteiden kautta siirtyvällä yhteydellä (Non-line-of-sight, NLOS).

Käytettävät radiotaajuusalueet voivat olla myös hyvin ruuhkaisia samalla taajuudella kulkevan muun liikenteen vuoksi. Tällainen alue on etenkin 2,4 GHz:n taajuusalue, jota WLAN-, Bluetooth- ja Zigbee-tekniikat hyödyntävät. Taajuusalueen ruuhkautuminen voi madaltaa dataliikenteen nopeutta, heikentää signaali-kohinasuhdetta ja aiheuttaa jopa palvelun täydellistä toimimattomuutta. [9, s. 14; 10; 11, s. 49–56; 12, 13, 14.]

Lähetysteho

Langattoman radiolähettimen teho ilmaistaan milliwatteina (mW) tai desibeleinä (dB). Desibeli on suhteellinen suure, ja sitä verrataan erikseen määriteltyyn referenssiarvoon. Radio-, mikroaalto- ja valokuituverkoissa käytetään tyypillisesti desibeli-milliwatti -arvoa (dBm), joka vertaa desibeliä 1 milliwatin tehoon ja on täten absoluuttinen arvo. Tehon (mW) kaksinkertaistuminen vastaa 3 dBm:n lisäystä signaalin voimakkuuteen. Desibeli-milliwattiarvolla voidaan käytännöllisesti esittää hyvin pieniä ja suuria arvoja, ilman desimaalien määrän suurta vaihtelua. [15.]

Tehon P (mW) ja signaalinvoimakkuuden x (dBm) suhde voidaan selvittää laskemalla [15.]:

$$x = 10 \log_{10} * \frac{P}{1 \text{ mW}}$$

$$P = 1 \text{ mW} * 10^{\frac{x}{10}}$$

Taulukossa 1 on esitetty tyypillisiä lähetystehoja aiheeseen liittyville laitteille.

Taulukko 1. Laitteiden lähetystehoja [15; 16, s. 6]

Signaalinvoim.	Teho	Laite
80 dBm	100 kW	Tyypillinen FM-radioaseman lähetysteho 50 km säteelle
27 dBm	500 mW	Tyypillinen matkapuhelimen lähetysteho
26 dBm	400 mW	Suuritehoinen WLAN-tukiasema
21 dBm	125 mW	UMTS/3G –matkapuhelimien maksimilähetysteho
20 dBm	100 mW	Bluetooth Class 1 radio, 100 m kantama (Euroopassa suurin sallittu lähetysteho 2,4 GHz kaistalla)
17 dBm	50 mW	Tyypillinen WLAN-tukiasema
15 dBm	32 mW	Tyypillinen kannettavan tietokoneen WLAN-lähetysteho
4 dBm	2,5 mW	Bluetooth Class 2 radio, 10 m kantama
0 dBm	1 mW	Bluetooth Class 3 radio, 1 m kantama
-10 dBm	100 μ W	Langattoman lähiverkon maksimi vastaanottoteho (IEEE 802.11x)
-70 dBm	0,1 pW	Langattoman lähiverkon minimi vastaanottoteho (IEEE 802.11x)

Signaalin vaimentuminen

Signaalien vaimentumista mitataan dB-suureella (desibeli). Signaalin vaimentuessa liian paljon on lähetystehoa tai lähettämiä lisättävä. Signaalin vaimentuminen erilaisissa rakenteissa riippuu signaalin taajuudesta ja väliaineen läpäisyvaimennusarvosta. Hyvin toimivan järjestelmän suunnittelemiseksi voidaan pitää nyrkkisääntönä +10 dB:n ylimittotusta signaalinvoimakkuuden todellisesta tarpeesta. Kriittisissä järjestelmissä jopa +20 dB:n lisäystä. [16, s. 2; 17.]

Taulukossa 2 on esitetty Suomessa tyypillisten rakennemateriaalien ja niiden yhdistelmien läpäisyvaimennusarvoja.

Taulukko 2. Rakennemateriaalien läpäisyvaimennuksia [9, s. 15]

Materiaali	500 MHz	1000 MHz	2000 MHz	3500 MHz	5000 MHz
Tiili (180 mm)	4	5,5	8	20	32
Tiili (180 mm) ja betonielementti (203 mm)	21	25	33	60	67
Tiili (180 mm) ja kevytlekaharkko	8	11	10	29	33
Betonielementti (208)	20	23	29	47	49
Kevytlekaharkko (2 x 203 mm)	13	17	18	25	28
Raudoitettu betonielementti (203 mm) 140 x 140 mm	22	28	31	50	53
Raudoitettu betonielementti (203 mm) 70 x 70 mm	26	30	37	53	58
Ikkunalasi (13 mm)	1	2	3	0,5	0,5
Kuiva puu (38 mm)	2	3	3	3	3
Kuiva puu (152 mm)	5	6	9	19	20

Signaali-kohinasuhde

Signaali-kohinasuhde (Signal-to-noise –ratio, SNR, S/N) kuvaa hyötysignaalin ja kohinasignaalin tehojen suhdetta. Mitä korkeampi suhdeluku, sitä parempi hyötysignaalin tunnistettavuus kohinan seasta. on. Paikannuskäytössä on tärkeää erottaa paikannuspulssi luotettavasti muun signaalikohinan joukosta.

Signaali-kohinasuhde voidaan laskea suhdelukuna [18.]:

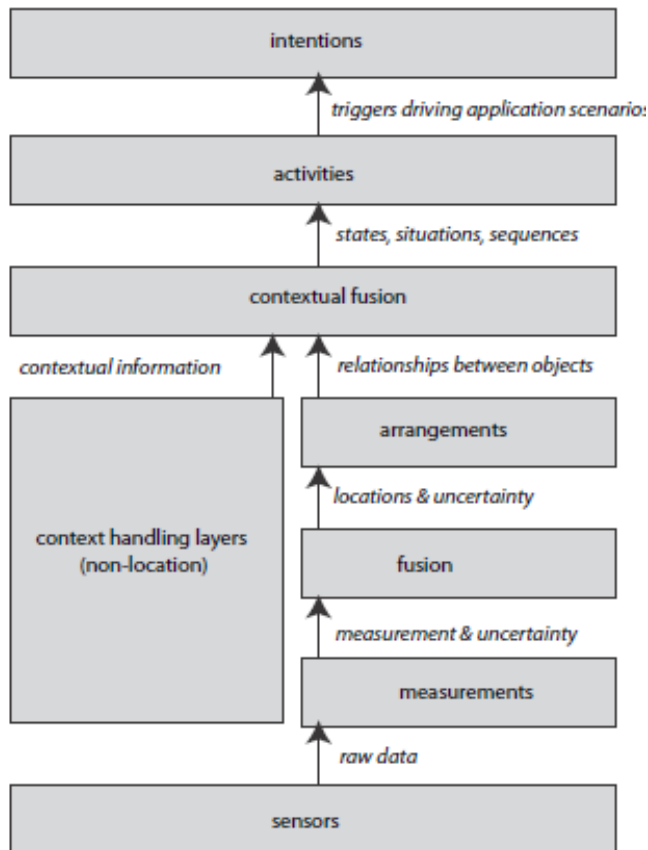
$$SNR = \frac{P_{hyöty}}{P_{kohina}}$$

Tai desibeleinä [18.]:

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{P_{signaali}}{P_{kohina}}$$

5 Paikannussignaalin käsittely- ja laskentamenetelmät

Paikannusprosessin tapahtumat voidaan esittää vaiheittain kuvan 3 lohkokaaavion avulla. Lohkokaavio jakautuu seitsemään tasoon, jotka yksinkertaistetusti havainnollistavat paikannusprosessin toiminnan ja saadun paikannustuloksen aktivoimia toimintoja.



The Location Stack [35].

Kuva 3. Paikannusprosessin lohkokaavio [19, s. 31–32].

1. *Havainnointi* on paikannuksen ensimmäinen taso, jolla vastaanottimet keräävät tunnistaiden lähettämän tiedon.
2. *Laskelmien* tasolla yksittäisen vastaanottimen keräämä signaalitieto analysoidaan ja paikannettavan kohteen sijaintia arvioidaan sopivalla signaalin laskentamenetelmällä.

3. *Fuusiolaskelmissa* yhdistetään eri vastaanottimien samasta tunnisteesta keräämä data. Useiden vastaanotinten saama tieto kohteesta lisää paikannustarkkuutta ja vähentää vääriä johtopäätöksiä. Fuusiolaskelmilla saadaan myös muuta lisätietoa kohteesta, kuten etenemisnopeus tai kiihtyvyys.
4. *Järjestelyjen* taso päättelee paikannuskohteen ja ympäristön suhteita liikkuvan signaalin näkökulmasta.
5. *Kontekstuaalisen fuusion* taso yhdistää lasketun paikannusdatan ja erilaisen paikantamiseen liittymättömän datan (kalenteri, sähköposti, muut fyysiset anturit) erilaisten lisäpalveluiden aikaansaamiseksi. Kontekstuaalisen fuusion avulla sovellukset voivat vuorovaikuttaa paikannuskohteen kanssa.
6. *Toimintojen* taso suorittaa toimintoja edellisen tason tuottaman tiedon perusteella, esim. kohdistettu mainonta sijaintitiedon perusteella.
7. *Aikomusten* taso analysoi paikannuskohteiden pitkäaikaista käyttäytymistä ja historiallisen datan perusteella suorittaa toimintoja, pyrkien vaikuttamaan paikannuskohteen aikeisiin. ”Käyttäjät, jotka ostivat tämän tuotteen, olivat myös kiinnostuneita seuraavista...”

Paikannuksen periaatteellisen toiminnan jälkeen on hyvä ymmärtää todellisia signaalilaskentamenetelmiä. Laskentamenetelmät perustuvat vastaanottimien keräämän signaalin voimakkuustason, signaalin tulokulman tai signaalien aikaerojen laskentaan tai näiden hybrideihin, joiden perusteella tekniikat pyrkivät päättelemään kohteen sijaintia paikannusavaruudessa. Osa laskentamenetelmistä liittyy myös ulkoalueen paikannukseen, mutta niiden toiminnan ymmärrystä voidaan tarvita etenkin laajempia kampuskonaisuuksia suunniteltaessa.

Signaalivoimakkuusmenetelmä

Yksinkertaisimmillaan signaalivoimakkuusmenetelmällä (Received Signal Strength, RSS) voidaan havaita paikannettavaan kohteen olevan vastaanottimen vaikutusalueella. Jos pulssia ei havaita, kohde on alueen ulkopuolella. Yhden vastaanottimen vastaanot-

tamalla pulssilla saadaan ainoastaan indikaatio kohteen sijaitsemisesta säteellä r vastaanottimen keskipisteestä. Tarkemman paikannuksen saavuttamiseksi on lisättävä vastaanottimia.

Tarkempia laskennallisia tuloksia kohteen sijainnista saadaan yhdistämällä usean vastaanottimen keräämä RSS-data toisiinsa. Tulosta voidaan vielä tarkentaa yhdistämällä tietoa saman alueen tukiasemilta, jotka eivät vastaanottaneet paikannussignaalia. [1, s. 26; 19, s. 32–36.]

Signaalinvoimakkuuskartoitus

Signaalinvoimakkuuskartoitus (fingerprinting) on kaksivaiheinen RSS-algoritmiin perustuva menetelmä. Ensimmäisessä vaiheessa paikannettavasta alueesta laaditaan signaalinvoimakkuuskartta (ns. sormenjälki), johon jälkimmäisessä seurantavaiheessa kerättyä reaaliaikaista paikannusdataa verrataan kohteen sijainnin määrittämiseksi.

Kartoitusvaiheessa koko paikannusalue kuljetaan läpi lähetinyksikön kanssa, luoden alueesta RSS-kartta. Kartoituksen tiedot tallennetaan tietokantaan, jonka on oltava koko ajan saatavilla luotettavan paikannustiedon saamiseksi. Dynaamisessa ympäristössä joudutaan kartoitus tekemään aina uudestaan sen muuttuessa, tai paikannustarkkuus voi kärsiä merkittävästi. [1, s. 26–27; 19, s. 37–38.]

Saapumisaikamenetelmä

Saapumisaikamenetelmää (Time of Arrival, TOA) käytetään GPS-satelliiteilla suoritettavaan paikannukseen. GPS-satelliiteissa on erittäin tarkka atomikello, jolta aikaleimattu signaali etenee navigointilaitteeseen. Navigointilaitteen oma aikakello on epätarkempi, mutta yhdistämällä useiden satelliittien signaalit saadaan riittävän tarkka arvio kohteen sijainnista. [1, s. 14; 19, s. 57.]

Saapumisaikaeromenetelmä

Saapumisaikaeromenetelmässä (Time Difference of Arrival, TDOA) vastaanotin mittaa lähettimen pulssien aikaeroa eri vastaanottimien välillä. Vastaanotinten sijainnit ovat järjestelmän tiedossa ja niiden kiinteän sijainnin avulla voidaan suorittaa paikannusanalyysi. TDOA-menetelmällä voidaan arvioida sijaintia vain tasokoordinaatistossa, eikä se yksin sovellu monikerroksiseen paikannukseen. [1, s. 21; 19, s. 57.]

Saapumiskulmamenetelmä

Saapumiskulmapaikannusmenetelmällä (Angle of Arrival, AOA) mitataan saapuvan signaalin tulokulmaa. AoA-menetelmä käyttää antennien joukkoa ja mittaa vastaanotettujen signaalien vaihe-eroja eri antennielementtien välillä. AOA-menetelmällä voidaan arvioida sijaintia xyz-koordinaatistossa ja täten se soveltuu myös useamman kerroksen paikannuksen arviointiin. [1, s. 23; 19, s. 57.]

6 Radioaalloilla toimivat paikannustekniikat

Radioaalloilla toimivat paikannustekniikat ovat perustana pääosalle aktiivisista sisätilapaikannusjärjestelmistä. Radioaaltopaikannustekniikoita on useita ja niitä erottaa osittain käytettävä taajuusalue ja tiedonsiirtotapa.

Radioaaltojen taajuuksien käyttö on säännelty tarkasti Viestintäviraston toimesta. Viraston taajuusjakotaulukko määrittelee taajuusalueiden ylä- ja alarajan, sen minkälaiseen käyttöön ko. taajuusalue on varattu, sekä suurimman sallitun säteilytehon alueilla. [20.]

6.1 WLAN-paikannus

WLAN-verkosta (Wireless Local Area Network) puhuttaessa tarkoitetaan yleensä IEEE802.11 -standardia, joka määrittelee verkossa tapahtuvan tiedonsiirtotavan, sekä muita ehtoja. WLAN-verkko toimii 2,4 GHz:n taajuusalueella nopeudella 450 Mb/s ja nopeudella 1300 Mb/s 5 GHz:n taajuusalueella. [12.]

WLAN-paikannus hyödyntää suuren tukiasemajoukon vastaanottamia signaaleja arvioidakseen langattoman lähettimen sijaintia. Järjestelmä päättelee kohteen sijainnin usean tukiaseman tuottaman datan fuusiolaskennalla. Oikein rakennetulla WLAN-paikannusjärjestelmällä päästään luotettavasti 3–7 m:n paikannustarkkuuteen. [21.]

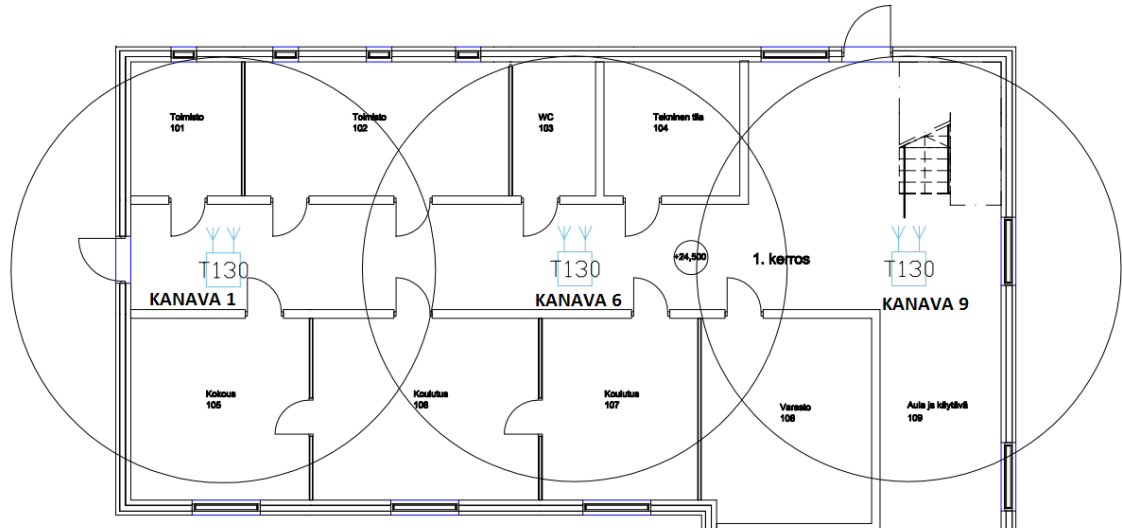
Langattomaan lähiverkkoon perustuvan paikannuksen etuja ovat järjestelmän helppo laajennettavuus ja yksinkertaisuus. Käytännössä kaikkiin uudisrakennuksiin suunnitellaan WLAN-peittoalue muun yleiskaapelointisuunnitelman ohessa, ja sen hyödyntäminen paikannukseen onkin vain suunnittelu- ja kustannustekninen asia. Yksinkertaiseen peruspeittoalueeseen verrattuna paikantavassa WLAN-lähiverkossa tukiasemia, telersioita ja kaapelointia joudutaan lisäämään.

Signaalinlaskennan kannalta WLAN-paikannuksen haasteita ovat useiden tukiasemien vastaanottaman tiedon suuri määrä ja sen ristiriitaisuus sekä RSS-menetelmän huono kerrosten välinen erottelevuus. Tukiasemien oikeanlainen sijoittelu ja käytettävien kanavien optimointi korostuvat WLAN-tukiasemia hyödyntävässä paikannusjärjestelmässä. Tukiasemien määrällä on tiettyyn pisteeseen asti kasvava funktio suhteessa paikannustarkkuuden kasvuun. Kriittisen pisteen jälkeen lisätyt tukiasemat voivat jopa heikentää paikannuksen tarkkuutta, koska signaalivoimakkuus eri tukiasemien välillä homogenisoituu liikaa. [1, s. 63; 21.]

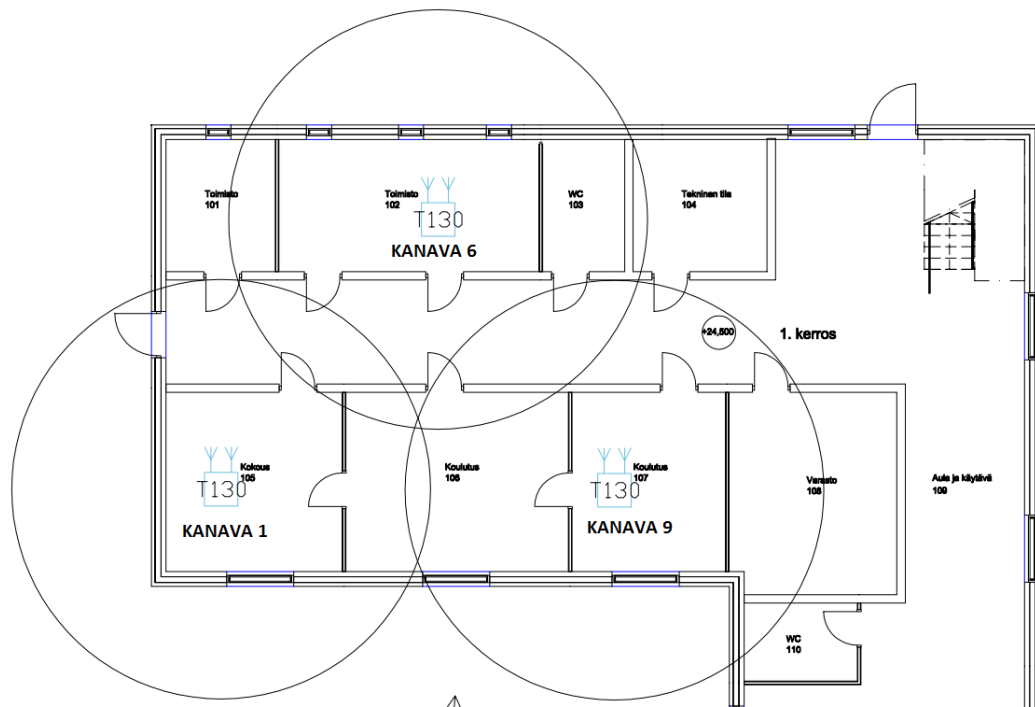
Paikannuskäytössä sopivan tukiasemamäärän oikeanlainen sijoittelu rakennuksen geometriaan on suuressa roolissa ja niiden symmetristä sijoittelua tulisi välttää. Tarkkaan paikannukseen vähimmäisvaatimuksena on kolmen tukiaseman kuuluminen paikannettavaan pisteeseen -75 dBm:n signaalivoimakkuudella. [22.] Tukiasemien epäsymmetrinen sijoittelu perustuu WLAN-lähiverkon käyttämiin kanaviin, joiden päällekkäisyyttä halutaan välttää. Suomessa pääasiassa käytössä ovat 2,4 GHz:n taajuusalueella kanavat 1, 6 ja 9. Jos liiallista päällekkäisyyttä kuitenkin tulee, käyttöön voidaan ottaa lisää kanavia. Tällöin yksittäisen kanavan taajuuskaista kapenee ja tiedonsiirtonopeus pienee.

WLAN-verkon tukiasemien sijoittelua suunnitellessa olisi usein käytännöllistä sijoittaa ne suoraan linjaan käytävällä kulkevan kaapelihyllyn sivuun, mutta paikannuskäytössä se ei välttämättä ole sopivin ratkaisu. Kuva 4 havainnollistaa periaatteellisesti symmetrisen tukiasemasijoittelun vaikutusta kuuluvuuteen ja kanavien vaikutusalueeseen. Kanavat

peittyvät toistensa päälle, ja keskimmäisen tukiaseman kanava peittyi viereisten tukiasemien signaalikohinalla. Kuvan 5 mukaisella sijoittelulla saavutetaan sopivampi peittoalue ja käytettävien kanavien optimointi.



Kuva 4. WLAN-paikannukseen heikosti soveltuva tukiasemasijoittelu.



Kuva 5. WLAN-paikannukseen paremmin soveltuva tukiasemasijoittelu.

6.2 Bluetooth Low Energy -paikannus

Bluetooth Low Energy (Bluetooth LE, BLE, Bluetooth Smart) on WPAN (Wireless Personal Area Network) -tekniikka, jonka tehonkulutus on parhaimmillaan 100 kertaa vähäisempi verrattuna perinteiseen Bluetooth-tekniikkaan. Pienestä tehonkulutuksesta johtuen se on hyvä ratkaisu akkutoimisten laitteiden elinkaaren kannalta. BLE toimii 2,4 GHz taajuusalueella, tekniikka kykenee 2 Mb/s tiedonsiirtonopeuteen ja sillä luvataan saavutettavan jopa < 1 m tarkkuus. Asiantuntijalausuntojen perusteella 3 m on jo varsin hyvä BLE:llä saavutettava todellinen paikannustarkkuus. [21.] Bluetooth toimii samalla taajuusalueella kuin WLAN-verkot ja päällekkäisyyden vähentämiseksi se hyödyntää taajuushyppelyhajaspektritekniikkaa (Frequency-hopping spread spectrum, FHSS), jonka avulla se lähettää dataa vapaana olevalle kanavalle. [13, 21, 23.]

BLE-paikannuksessa vastaanottimina käytetään Bluetooth-majakoita (beacon), jotka toimivat paristoilla, akuilla tai verkkovirralla. (kuva 6). Tyypillisillä asetuksilla pariston varaus kestää 2-3 vuotta. Paristokäyttö sopii hyvin erilaisiin väliaikaisasennuksiin (esim. messut) tai jälkiasennuksena kiinteistöön ilman kaapelointia.



Kuva 6. Erilaisia BLE -majakoita [24].

Majakkapohjainen paikannus voidaan toteuttaa palvelin- tai asiakaspohjaisena. Asiakaspohjainen paikannus tapahtuu älypuhelimeen asennettavalla sovelluksella, joka suorittaa paikannukseen liittyvät laskenta-algoritmit. Palvelinpohjaisella paikannuksella vastaanottimen signaalit prosessoidaan tietokonepalvelimella tai valmistajan pilvipalvelussa. Palvelinpohjaisella laskennalla päästään parempaan paikannustarkkuuteen kuin asiakaspohjaisella paikannuksella. [25.]

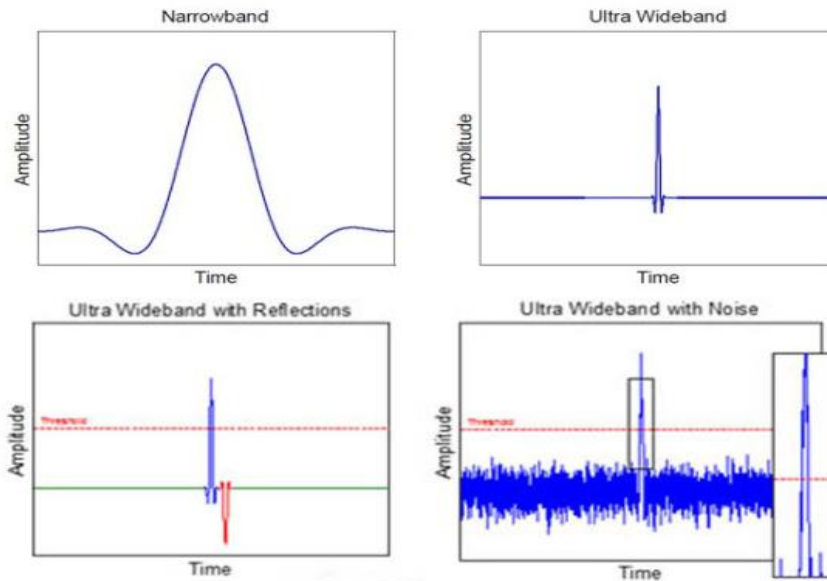
Kiinnostava variaatio BLE-paikannuksesta on Kaltiot Smart Tracker -järjestelmä, jossa paikannus tapahtuu ilman rakennettua vastaanotininfrastruktuuria. Järjestelmässä lähettimenä toimivat normaalit BLE-tunnisteet, mutta vastaanottimina toimivat mobiililaitteet, jotka valmistajan pilvipalvelun kautta suorittavat paikannuslaskelmat. [26.]

6.3 Ultra Wideband -paikannus

Ultra Wideband -paikannus hyödyntää hyvin leveää taajuuskaistaa (0,5–2 GHz), jolla lähetettävä paikannuspulssi on pienitehoinen ja voi silti sisältää paljon informaatiota. UWB-tekniikalle luvataan jopa $< 0,5$ m:n paikannustarkkuus. Eräiden tutkimusten mukaan jopa < 1 mm:n tarkkuus voidaan saavuttaa. [3.]

Toisin kuin moduloidussa siniaalossa, UWB-tekniikassa tieto lähetetään erittäin lyhyinä ja pienitehoisina pulssijonoina. Paikannuspulssin nouseva käyrä on jyrkkä, ja se mahdollistaa erittäin tarkan signaalin saapumisajan mittauksen sekä helpon tunnistettavuuden muusta signaalikohinasta. Tekniikka ei häiritse muita radiolaitteita, koska pulssit ovat pienitehoisia ja sekoittuvat muuhun signaalikohinaan. Pulssi on myös hyvin kapea, tyypillisesti alle kahden nanosekunnin mittainen. UWB-pulssi ei resonoi merkittävästi ympäröivien rakenteiden kanssa, josta johtuen signaalit heijastuvat erittäin vähän niiden kohtaamista pinnoista. Tekniikan haasteena on lähettimen ja vastaanottimen synkronointi pulssien lähtiessä nanosekuntien aikaeroilla toisistaan. [3, 27.]

Kuva 7 havainnollistaa UWB-pulssin nousevaa käyrää suhteessa kapeakaistaiseen pulssiin, sen selkeää erottuvuutta signaalikohinasta sekä sen rakenteista heijastumisen resistiivisyyttä.



Kuva 7. Ultra Wide Band -pulssien kuvaaja [28].

6.4 RFID-paikannus

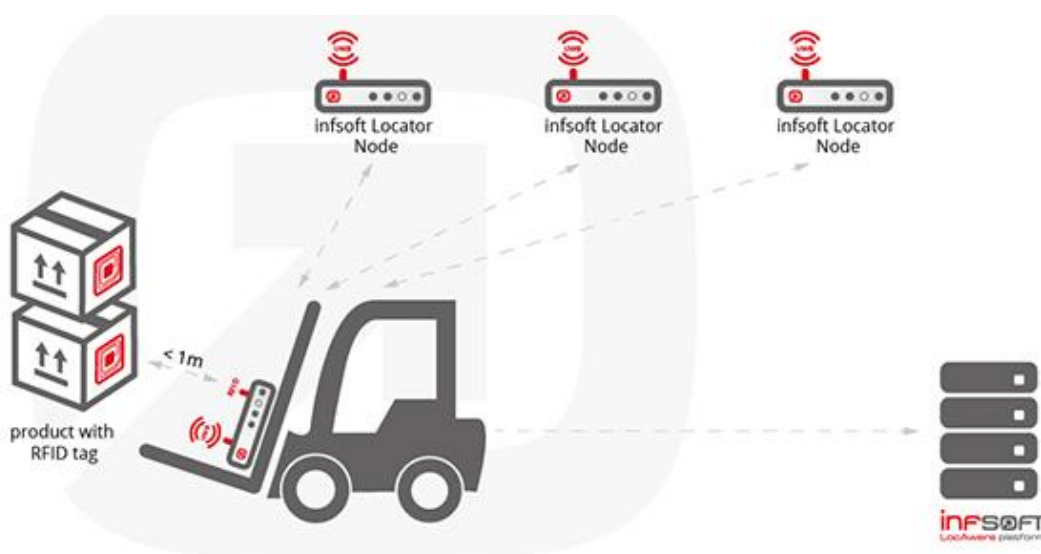
RFID-tekniikka (Radio Frequency Identification) on tiedon etäluvuun ja tallentamiseen käytettävä menetelmä. Tekniikka toimii usealla eri taajuusalueella, ja sen tiedonsiirtonopeus ja kantama riippuvat käytetystä taajuudesta. LF-alueella saavutetaan 10 cm:n toimintasäde, alhaisella tiedonsiirtonopeudella, kun UHF-alueella saavutetaan jopa 200 m:n kantama ja korkea tiedonsiirtonopeus. Taulukossa 3 on esitetty eri taajuusalueiden ominaisuuksia.

Taulukko 3. RFID taajuusalueet ja käyttökohteet [29]

Taajuusalue	Käyttökohteet
LF (30–300 kHz)	Eläinten tunnistus, esineiden jäljitys, autojen käynnistyksen- ja varkaudenesto, kulunvalvonta
HF (3–30 MHz)	Esineiden jäljitys (kirjat, kuormalavat, lentolaukut, vaatteet), kulunvalvonta
VHF (30–300 MHz)	Esineiden jäljitys (merikontit, arvotavara)
UHF (0,3–3 GHz)	Esineiden jäljitys (kuormalavat, merikontit, ajoneuvot, perävaunut)
Mikroaaltoalue (> 3 GHz)	Kulunvalvonta

RFID-järjestelmän tunnisteen voivat olla passiivisia, puolipassiivisia tai aktiivisia. Passiivinen tunnistee ei sisällä akkua, vaan aktivoituu RFID-lähtetimeltä tunnisteeseen indusoituneesta sähkövirrasta. Aktiiviset tunnisteen sisältävät oman akun ja ne lähettävät ajastetusti toistuvan paikannuspulssin vastaanottimelle. Puolipassiiviset tunnisteen sisältävät oman akun, mutta eivät aktivoidu ilman vastaanottimen lähettämää herätepulssia. [29.]

RFID-paikannusta käytetään yleensä hybridinä toisen järjestelmän rinnalla, esimerkiksi tuomalla perinteisen kulunvalvonnan lukijatiedon sisätilapaikannusjärjestelmään tai yhdistämällä trukin sijaintitieto ja kuormattavan tuotteen RFID-tunniste (kuva 8) automaattisen varastonhallinnan mahdollistamiseksi. [30.]

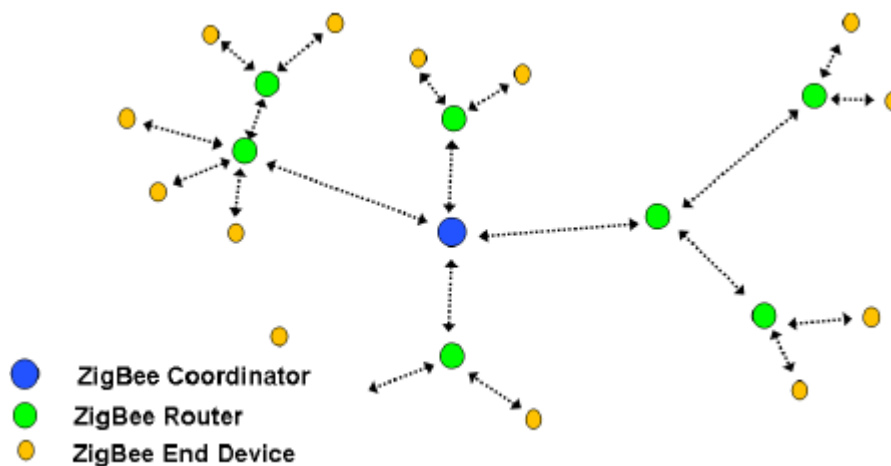


Kuva 8. RFID-tekniikkaan perustuva kuormantunnistus [30].

6.5 Zigbee

Zigbee on langaton, yksinkertainen ja edullinen tiedonsiirtoverkko, joka noudattaa WPAN-standardia (IEEE 802.15). Se toimii kansainvälisesti 2,4 GHz:n taajuusalueella 16:lla kanavalla 250 kb/s:n nopeudella. Euroopassa se toimii 868 MHz:n taajuudella, käytössä vain 1 kanava ja se ylittää 20 kb/s:n nopeuteen. Sen kantama on 10–100 m, riippuen lähetystehosta ja ympäristöstä. Zigbee verkko voi sisältää 65 536 laitetta. Laite kytkeytyy verkkoon nopeasti, alle 30 millisekunnissa.

Zigbeeen hyödyntämä mesh-verkkotopologia tekee siitä potentiaalisen vaihtoehdon langattomaan tiedonvälitykseen (kuva 9). Mesh-topologian avulla tietoa voidaan välittää läheisten laitteiden kautta verkon PAN-koordinaattoriyksikölle, joka vastaa verkon toiminnasta ja ohjauksesta. Mesh-verkon etuna on myös sen kyky korjata yhteysvirheet automaattisesti: jos yksi yhdyskäytävä katkeaa, osaa se reitittää itsensä toisen laitteen kautta PAN-yksikölle. Zigbeeen luvataan myös toimivan haastavassa ympäristössä, joissa on matala signaali-kohinasuhde.



Kuva 9. Zigbeeen hyödyntämä mesh-verkkotopologia [31].

Mesh-verkkotopologian hyvistä ominaisuuksista ja nopeasta kytkeytymisajasta huolimatta, Zigbee-teknologiaa ei ole juuri hyödynnetty kaupallisissa järjestelmissä, ja siitä on saatavilla vain vähän raportoitua testaustietoa. [14.]

7 Muita paikannustekniikoita

Tässä luvussa esitettävät paikannustekniikat hyödyntävät esimerkiksi radioaaltojen ulkopuolista sähkömagneettisen säteilyn spektriä (infrapunasäteily ja näkyvä valo), ultraääntä tai maapallon omaa magneettikenttää tekniikassaan. Pääasiassa tekniikat täydentävät jotakin radioaaltoihin perustuvaa tekniikkaa lisäten paikannustarkkuutta ja vähentäen epävarmuustekijöitä.

7.1 IR-säteilyyn perustuva paikannus

Infrapunasäteilyyn perustuva paikannus hyödyntää näkyvän valon alapuolista aluetta sähkömagneettisen säteilyn spektristä (700 nm... 1 mm.), joka on näkyvää valoa vähemmän "häiritsevä" paikannusmenetelmä sisätiloissa. IR-paikannus toimii joko suorasti tai epäsuorasti. Suora IR-paikannus vaatii nimensä mukaisesti suoran näköyhteyden lähettimen ja vastaanottimen välillä, ja sillä on rajallinen kantama. Epäsuorassa IR-paikannuksessa hyödynnetään laajakulmaisia LED:jä, jotka lähettävät signaaleja useisiin suuntiin, eivätkä vaadi suoraa näköyhteyttä signaalin vastaanottamiseksi. Epäsuoran IR-paikannuksen kantama on jopa 12 m hyvissä olosuhteissa lähettimen ja vastaanottimen välillä. [32, 33.]

7.2 Näkyvään valoon perustuva paikannus

Näkyvään valoon perustuva paikannus (Visible Light Communication, VLC) hyödyntää näkyvän valon spektriä (375 nm... 780 nm) ja kykenee loistelampuilla 10 kb/s:n ja LED:llä 500 Mb/s:n tiedonsiirtonopeuteen. VLC:n toiminta perustuu ihmissilmällä havaitsemattomaan valaisinten nopeaan päälle ja pois kytkentään. Valaisimen päälle- ja pois-tilat edustavat 1- ja 0-bittejä, joiden avulla VLC-järjestelmä kommunikoi paikannuslaitteen (mobiililaite) kanssa (kuva 10).

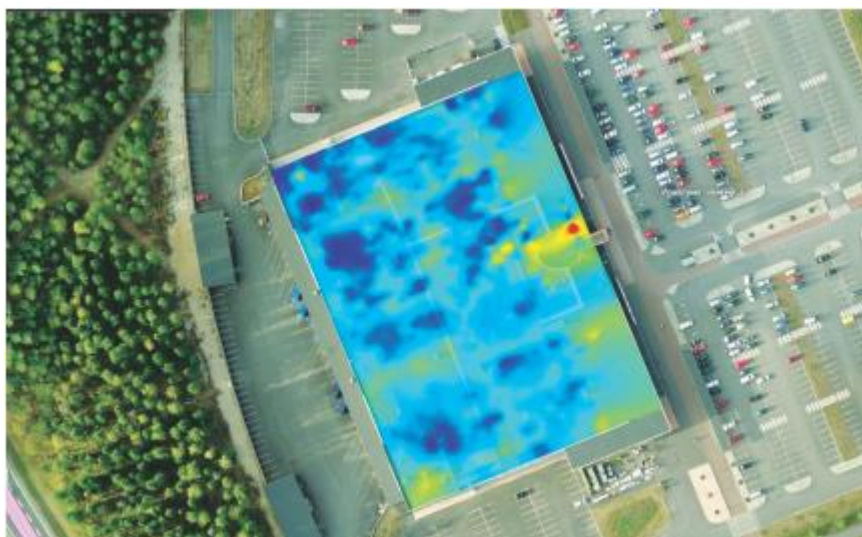
Näkyvään valoon perustuva paikannus soveltuu hyvin vähittäiskaappoihin, joissa tyypillinen käytetty valaistustapa sopii tekniikan toiminnalle ja se tarjoaa riittävän paikannustarkkuuden. Järjestelmän haittoina ovat suuret hankintakustannukset, koska käyttöön tarvitaan VLC:tä tukevat erikoisvalaisimet. [34, 35; 36, s. 28.]



Kuva 10. Visible Light Communication –toimintaperiaate [35].

7.3 Magneettinen paikannus

Magneettinen paikannus perustuu maapallon omaan magneettikenttään syntyviin paikallisiin vaihteluihin sen edetessä rakennuksen metallisten rakenteiden läpi (kuva 11). Sitä varten ei tarvitse rakentaa minkäänlaista vastaanotininfrastruktuuria, vaan magnetometrillä varustetulla mobiililaitteella voidaan kartoittaa nämä vaihtelut ja luoda magneettinen kartta sisätiloista. Liikkuvat metalliset esineet muuttavat tätä magneettista jälkeä, aiheuttaen paikannusepätarkkuutta. Tällaisia ovat esimerkiksi rakennuksessa kulkeva hissi tai teollisuusympäristössä liikkuvat nostimet ja muut suuret metalliset kappaleet. Magneettinen paikannus kykenee sisätiloissa 2–3 metrin paikannustarkkuuteen. [37.]



Kuva 11. Magneettinen kartta rakennuksen sisätiloista [37].

7.4 Ultraäänipaikannus

Ultraääni on ihmiskorvan kuuloalueen yläpuolella olevaa ääntä (> 20 kHz). Ultraääni on paineen synnyttämää mekaanista aaltoliikettä, ja se on immuuni sähkömagneettisille häiriöille. Edetäkseen se tarvitsee väliaineen ja vaimenee voimakkaasti ilmassa. Ultraääneen perustuvassa paikannuksessa mikrofonianturi vastaanottaa lähettimen pulssin ja kahden laitteen välistä matkaa arvioidaan ToA-menetelmällä. Vastaanottimen sijainti on järjestelmälle tunnettu. Ultraäänipaikannus kykenee < 1 m:n paikannustarkkuuteen. Ultraäänipaikannuksen vastaanottimilla voidaan esimerkiksi varmistaa huonetason paikannustulos, koska ilmassa etenevä ultraääni ei läpäise seinärakenteita. [21, 38.]

Taulukossa 4 on esitetty yhteenveto esiteltyjen paikannustekniikoiden keskeisistä ominaisuuksista.

Taulukko 4. Paikannustekniikoiden ominaisuuksien vertailu [1, s. 29; 4, taulukko 1; 12, 13, 14, 21, 26, 27, 29, 32, 34; 35, s. 32; 36, 37, 38, 39]

Tekniikka	Tarkkuus (m)	kantama (m)	Taajuus	Tiedonsiirtonopeus
WLAN	3 – 7	< 100	2,4 GHz	450 Mb/s (2,4 GHz)
BLE	3 – 7	< 100	2,4 GHz	2 Mb/s
RFID	0,1 - 10	0,1 - 200	30 kHz – 10 GHz	matala - korkea
UWB	0,15 - 0,5	10 – 200	1 – 10 GHz	~100 kb/s – ~100 Mb/s
Zigbee	1 – 10	10 – 100	868 MHz ja 2,4 GHz	20 kb/s
IR	< 1	< 12	0,3–430 THz	-
VLC	< 0,5	< 8	430–750 THz	10 kb/s (loistelamppu), 500 Mb/s (LED)
Ultraääni	< 1	Lyhyt	-	-
Magneettinen	1-3	-	-	-

Taulukossa esitetyt arvot ovat arvioita ja keskiarvoja aiheeseen liittyvien tutkimusten ja valmistajien ilmoittamista tiedoista, mutta kykenevät antamaan kohtuullisen yleiskuvan eri tekniikoiden tarkkuudesta. Tekniikoiden vertailuarvot eivät ole yksiselitteisiä, sillä tilaratkaisut ja pintamateriaalit voivat vaikuttaa merkittävästi eri tekniikoiden kantamiin ja paikannustarkkuuksiin.

8 Kaupalliset paikannusjärjestelmät

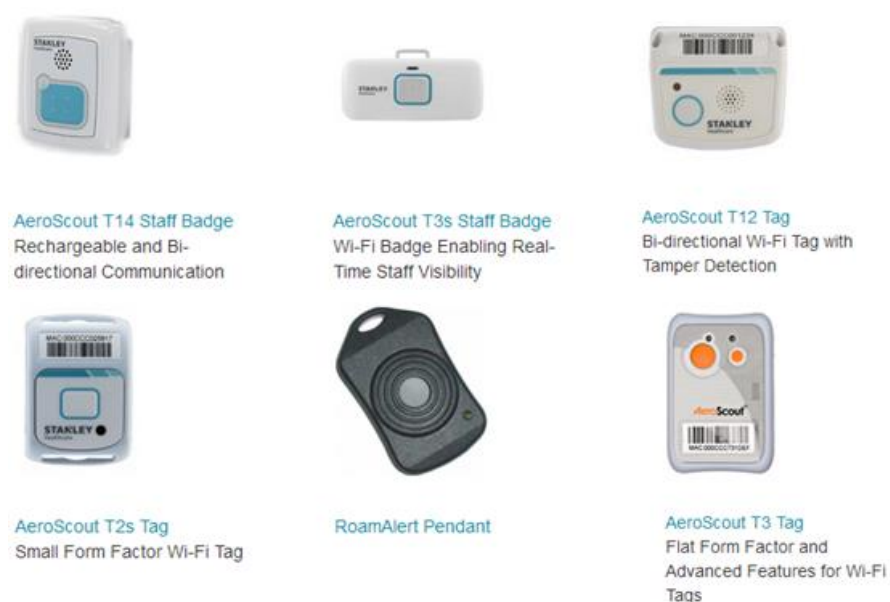
Tässä luvussa esitellään kaupallisia sisätilapaikannusjärjestelmiä, kattaen aiemmin esitetyt radioaalloilla toimivat pääpaikannustekniikat (pl. Zigbee, jota hyödyntävää kaupallista ratkaisua ei löytynyt). Tiedot perustuvat valmistajien ilmoittamiin tietoihin ja tuotesittelyihin. Järjestelmien kustannusrakenteita on käsitelty liitteessä 1.

8.1 Stanley Healthcare Aeroscout

Aeroscout-järjestelmä on suunnattu erityisesti terveydenhuollon tarpeisiin, ja kokonaisuuteen kuuluu paikannuksen lisäksi erilaisia täydentäviä laitteita, jotka kommunikoivat saumattomasti järjestelmän kanssa. Täydentäviä laitteita ovat esim. lämpötila- ja ilman-kosteusanturit lääkekaappeihin, hoitohenkilökunnan käsihygienian automaattinen tarkkailu, paineanturit havaitsemaan potilaan kaatuminen ja vapaasti ohjelmoitavat painikkeet erilaisiin käyttötarkoituksiin.

Aeroscout-paikannusjärjestelmä toimii WLAN-, RFID- ja ultraäänitekniikoilla, ja sitä voidaan käyttää henkilö- ja omaisuuspaikannukseen. Järjestelmän tarkkuudeksi luvataan 3–7 m pelkällä WLAN-tukiasemainfrastruktuurilla ja huonetason paikannus käyttämällä huonekohtaisia lisäpaikantimia (exciter). Lisäpaikantimet ovat joko ultraääni- tai RFID-toimisia. Huoneen sisäpuolelle asennetun exciterin lähettämä ultraäänipulssi ei läpäise seinärakenteita, ja sen avulla saadaan luotettava huonekohtainen paikkatieto.

Stanley Healthcaren lähettimet (kuva 12) sopivat henkilökunta-, potilas-, asukas- ja omaisuuskäyttöön. Niitä on saatavilla rannekemallisenä, kaulassa pidettävänä, vauvoille nilkkaan sopivana ja tarrakiinnitteisenä esineisiin. Niiden ominaisuuksia ovat mm. kaksisuuntainen tiedonvälitys ja vesitiiviys (IP 67).



Kuva 12. Stanley Healthcare tunnisteita [40].

Järjestelmän paikannusmoottorina toimii Aer Scout Location Engine, jonka kalibrointi tapahtuu automaattisesti, eikä sitä tarvitse kartoittaa uudelleen tilajärjestelyiden muuttuessa. Järjestelmän paikannustarkkuus lisääntyy sen käyttöajan kuluessa. Sen keräämä paikannusdata tallennetaan tietokantaan, jota analysoimalla saavutetaan parempia paikannustuloksia pidemmällä aikajänteellä.

Järjestelmän käyttösovelluksena toimii MobileView Platform, jonka avulla visualisoidaan reaaliaikaisesti paikannustulos rakennuksen pohjapiirustuksen avulla, hallinnoidaan muita toiminnallisuuksia (haku ja jäljitystoiminnot tunnisteille, anturitiedot, käsihygieniat, tagien hallinnointi, jne.), suoritetaan data-analyysejä ja generoidaan erilaisia hälytyksiä.

Verrattuna moniin alalla toimiviin start-up -yrityksiin Stanleyyn vahvuutena on yrityksen pitkäikäisyys. Palvelun tilaaja voi olla varma, että kymmenen vuoden päästä tuotetukea on edelleen saatavilla. Stanleyllä on valvontakeskukset kolmella mantereella, joista järjestelmän tukitoiminnot ja valvonta tapahtuvat ympärivuorokautisesti läpi vuoden.

Mitä suurempi kohde on kyseessä, sitä kustannustehokkaammaksi Stanleyyn järjestelmän hankinta tulee. Stanley tarjoaa ns. avaimet käteen -paketin, johon kaikki esitetyt toiminnallisuudet rakennetaan suoraan. Tilaaja voi eri lisensseillä avata näitä toimintoja tarpeensa mukaan. [21.]

8.2 Ekahau RTLS

Myös Ekahaun järjestelmä on suunnattu terveydenhuollon tarpeisiin. Paikannusominaisuuden lisäksi järjestelmää voi laajentaa lämpötila- ja kosteusantureilla ja käsihygienian automaattitarkkailuun soveltuvilla laitteilla.

Ekahau RTLS on hybridi paikannusjärjestelmä, joka yhdistää WLAN-, RFID- ja IR-tekniikat. Yhdistelmällä saavutetaan huonetasoinen paikannustarkkuus. Tarkemman paikannuksen saavuttamiseksi, järjestelmää voidaan laajentaa Ekahau IR-majakoilla, joiden avulla luvataan saavutettavan jopa 1 m:n paikannustarkkuus.

Järjestelmän lähettämiä ovat (kuva 13):

- T-301-A Asset WiFi-tag, laitepaikannukseen
- T301-BD Personal WiFi Badge, henkilökunnan paikannukseen
- T301 W Patient Wifi-Tag, potilaspaiannukseen.



Kuva 13. Ekahau RTLS -tunnisteet [41, s. 13–15].

Järjestelmän paikannusmoottorina toimii Ekahau RTLS Controller SW, jonka kalibrointi tapahtuu fingerprinting-tekniikalla ja vaatii uudelleenkartoituksen aina tilajärjestelyiden merkittävästi muuttuessa.

Järjestelmän käyttösovelluksena toimii Ekahau Vision, jonka avulla esitetään reaaliaikaisesti paikannus rakennuksen pohjapiirustuksessa, hallinnoidaan muita toiminnallisuuksia (haku ja jäljitystoiminnot tunnisteille, anturitiedot, käsihygieniat, tagien hallinnointi jne.), suoritetaan data-analyysit ja generoidaan erilaiset hälytykset. [41, 42.]

8.3 9Solutions RTLS

9Solutions on hoivaratkaisu, johon kuuluu joukko terveydenhoitoa avustavia toimintoja paikannuksenjärjestelmän lisäksi. 9Solutions-paikannusjärjestelmä hyödyntää Bluetooth Low Energy -tekniikkaa, ja sitä voidaan käyttää ihmisten ja omaisuuden paikallistamiseen. Järjestelmällä luvataan saavutettavan huonetason tarkkuus.

Järjestelmän henkilöpaikannuslähetin (kuva 14) voidaan kiinnittää klipsillä, kaulanauhalla tai rannekkeella, potilaslähetin voidaan lisäksi lukita. Lähettimien ominaisuuksia ovat mm. kaksi ohjelmoitavaa painiketta ja vedenkestävyys.

Järjestelmän aivoina toimii 9Solutionsin oma pilvipalvelu, jossa suoritetaan kaikki paikannukseen liittyvät laskenta-algoritmit. Järjestelmää voidaan laajentaa lisälaitteella, mikä mahdollistaa sen kriittisten toimintojen säilyvyyden ilman ulkopuolisia yhteyksiä ja varmistaa järjestelmän toiminnallisuuden myös sisäverkko- ja palvelinongelmien aikana.

Järjestelmän kalibrointi tapahtuu automaattisesti. Sen lähetininfrastruktuuri on itseorganisoituva, eikä tilamuutokset aiheuta ongelmia järjestelmän toiminnalle. [4, s. 21–22.]



Kuva 14. 9Solutions-henkilötunniste [43].

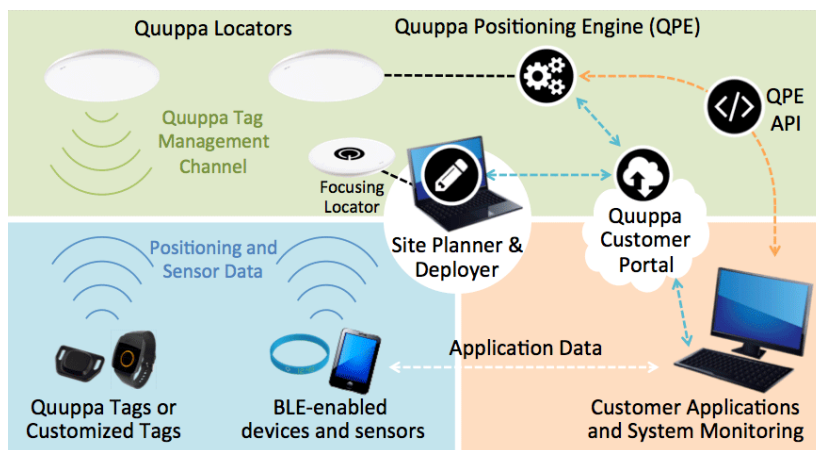
8.4 Quuppa Intelligent Location System

Quuppa Intelligent Location System on puhdas paikannusjärjestelmä, joka hyödyntää Bluetooth LE -tekniikkaa ja AoA-signaalinlaskentamenetelmää paikannuksessaan. Järjestelmän tyypilliseksi paikannustarkkuudeksi luvataan 0,5 m, ja huipputarkkuudeksi jopa 10 cm. Kaikki järjestelmän komponentit on esitetty kuvassa 15.

Järjestelmässä on saatavilla vain yksi tunnistetyyppi, Quuppa Standard Tag, jonka akun kesto 1 Hz:n taajuudella on noin 12 kuukautta. Sen ominaisuuksia ovat iskunkestävyys ja vedenpitävyys. Quupan järjestelmä on kuitenkin yhteensopiva kaikkien BLE-standardin laitteiden kanssa, ja tilaaja voi itse valita sopivan tunnisteen tai laitteen markkinoilta. Jos tilaaja haluaa suunnitella oman tunnisteesensa, toimittaa Quuppa tarvittavat piirikaaviot teknisen suunnittelun perustaksi.

Järjestelmän aivoina toimii Quuppa Positioning Engine, jonka luvataan pystyvän luotettavaan paikannukseen haastavissa ympäristöissäkin, joissa käytettävä taajuusalue on ruuhkautunut.

Käyttösovelluksena järjestelmässä toimii käyttöjärjestelmäriippumaton java-pohjainen Quuppa Customer Portal, jolla suoritetaan tunnisteen hallinnointi, sijainninosoitus, hälytykset, lisenssinhallinta ja tilaukset. [4, s. 29–31; 44.]



Kuva 15. Quuppa Intelligent Locating Systemin komponentit [45].

8.5 Kaltiot Smart Tracker

Kaltiot Smart Tracker on uudenlainen Bluetooth LE -tekniikkaan perustuva paikannusjärjestelmä. Toimiakseen järjestelmä ei vaadi erikseen rakennettua vastaanotininfrastruktuuria, vaan tilaajan henkilöstön matkapuhelimet voivat toimiva järjestelmän tukiasemina ja tunnisteina.

Tarkemman ja luotettavamman paikannuksen saavuttamiseksi järjestelmää voidaan laajentaa BLE-majakoilla. Majakat ovat akkutoimisia, ja järjestelmä voidaan toteuttaa ilman kaapelointia. Kaltiot ei itse valmista tunnisteita tai majakoita, mutta mitä tahansa standardin täyttävää BLE-laitetta voidaan hyödyntää järjestelmässä. Järjestelmälle luvataan 1–5 m:n paikannustarkkuus.

Paikannusjärjestelmän aivoina toimii Kaltiot Smart IoT -pilvipalvelu, eikä tilaajan tarvitse paikallisesti asentaa sovelluksia tai ylläpitää palvelimia. Kaltiot Smart Tracker -järjestelmän hinnoittelu on kuukausiperusteinen ja he tarjoavat erilaisia palvelupaketteja käyttäjän tarpeen mukaan. [26, 46.]

8.6 Zebra Dart UWB

Zebra Dart -paikannusjärjestelmä hyödyntää Ultra Wideband -tekniikkaa, ja sille luvataan jopa 30 cm:n paikannustarkkuus ja vastaanottimille 200 metrin kantama. Järjestelmän vastaanottimet voidaan kaapeloida väylämäisesti, mikä tuo säästöjä kaapelointikuluihin (vrt. tähtimäinen kaapelointi).

Järjestelmässä on kaksi tunnistetyyppiä (kuva 16): omaisuuspaikannukseen tarkoitettu DartTag sekä henkilö- ja omaisuuspaikannukseen tarkoitettu DartTag Badge. Tunnisteiden mekaanisia ominaisuuksia ovat mm. veden- ja pölyntiiviys (IP 67) ja putoamiskestävyys 1,8 m:n korkeudelta.



Kuva 16. DartTag -tunnisteet [47].

Järjestelmän aivoina toimii Dart Hub -keskitin (kuva 19), joka toimitetaan integroidulla java-pohjaisella paikannusohjelmistolla. Ohjelmistolla voidaan suorittaa järjestelmän konfigurointi ja visualisoida paikannustulokset selainpohjaisessa graafisessa käyttöliittymässä. [4, s. 22–24; 47.]



Kuva 17. Dart Hub -keskitin [47].

8.7 Ubisense Dimension4

Ubisensen Dimension4 -paikannusjärjestelmä hyödyntää UWB-tekniikkaa paikannuksessaan. Järjestelmä hyödyntää AoA- ja TDOA-laskentamenetelmiä sijainnin arviointiin. Paikannuksen tarkkuudeksi luvataan 15 cm.

Järjestelmän tunnisteita ovat (kuva 18):

- Akkutoiminen Mini Tag
- Akkutoiminen Industrial Tag soveltuu ajoneuvojen ja omaisuuden paikannukseen vaativissa teollisuusolosuhteissa. Lisäoptiona tunnisteseen saa GPS-tuen ulkopaikannusta varten.
- Akkutoiminen Tool Tag on muotoiltu teollisuuden työkaluihin soveltuvaksi.



Kuva 18. Dimension4-paikannusjärjestelmän tunnisteita [48].

Tunnisteiden virkistystaajuus on ohjelmoitavissa 1–30 Hz:n välillä. Käyttämällä matalampaa virkistystaajuutta voidaan pidentää tunnisteen akun kestoa. Nopeassa liikkeessä olevan tunnisteen tarkka paikannus vaatii korkeamman virkistystaajuuden. [4, s. 25–28; 49.]

9 Tulokset

Työn tavoitteena oli aktiiviseen sisätilapaikannukseen soveltuvien tekniikoiden vertailu, pääpainona erilaiset radioaaltoihin perustuvat tekniikat. Keskeisinä mittareina olivat järjestelmän suorituskyky, suunnittelussa huomioitavat asiat ja toteutuskustannukset. Asiakkaat ja sidosryhmät tiedustelevat aiheesta usein, ja erityisesti kustannusrakenteista oli tarve saada lisätietoa. Liitteeseen 1 on kerätty markkinoiden kaupallisten sisätilapaikannusjärjestelmien ominaisuuksia mahdollisimman kattavasti.

Tekninen suorituskyky

Työn perusteella kaupallisten radioaalloilla toimivien järjestelmien pääpaikannustekniikat ovat WLAN-, Bluetooth Low Energy- ja ultra wideband -paikannus. Yksittäisistä sisätilapaikannukseen sopivista tekniikoista UWB-tekniikka mahdollistaa parhaan paikannustarkkuuden, valmistajien luvatta järjestelmänsä kykenevän jopa 15–30 cm:n tarkkuuteen. WLAN- ja BLE-tekniikoille luvataan jopa 0,5–1 m:n paikannustarkkuus. Asiantuntijalausuntojen mukaan todellisessa NLOS-tilanteessa saavutetaan noin 3–7 m:n paikannustarkkuus. [21.]

Käytännön mittauksissa vuonna 2010 Ubisensen UWB-järjestelmällä on saavutettu luotettavasti NLOS-tilanteessa 30 cm:n tarkkuus XY-koordinaatistossa ja 60 cm:n tarkkuus 3D-koordinaatistossa. Suoralla näköyhteydellä saavutettiin 27 cm:n paikannustarkkuus XY- ja XYZ-koordinaatistossa. [11, s. 49–56.]

Suunnittelunäkökohdat

Standardiratkaisua sisätilapaikannusjärjestelmäksi ei joka tilanteeseen ole, vaan tapauskohtaisesti on arvioitava sopiva teknologia paikannuksen toteuttamiseksi. Järjestelmäsuunnittelun kannalta tärkein määräävä tekijä on siltä vaadittava paikannustarkkuus. Määrittelyn tarkkuuden pohjalta voidaan valita soveltuva pääpaikannustekniikka ja tarkastella muita järjestelmän vaatimuksia.

Radioaaltoihin perustuvien paikannustekniikoiden haasteena on heikko huone- ja kerrosrottelevuus. Pelkällä vastaanotetun signaalinvoimakkuuden tai signaalien aikaerojen perusteella ei voida varmistaa huonetilaa, josta signaali on lähetty. Toisaalta, liian tiheä vastaanotininfrastruktuuri voi homogenisoida signaalien vastaanottoa niin paljon,

että luotettavaa paikannustulosta ei voida saavuttaa. Huonetasoista paikannusta vaadittaessa on usein suositeltavaa yhdistää eri tekniikoita luotettavan paikannuksen aikaansaamiseksi.

Kaupallisten järjestelmien toimittajat suorittavat kohdekohtaisesti omien järjestelmiensä suunnittelun ja ovat suoraan yhteydessä tilaajan kanssa. Paikannusjärjestelmää hankittaessa on suositeltavaa ottaa järjestelmätoimittaja mukaan jo suunnittelun alkuvaiheessa, jolloin he voivat avustaa tilaajaa teknisissä ratkaisuissa ja haasteissa.

Kustannukset

Järjestelmien kustannusrakenteiden selvitys osoittautui haasteelliseksi, sillä järjestelmien hinnat eivät useimmiten ole avointa tietoa. Järjestelmätoimittajat eivät vastanneet kustannustiedusteluihin erityisen aktiivisesti ja kustannuksia voidaan esittää lähinnä niiden suhteellisella keskinäisellä vertailulla. Useiden valmistajien hinnoittelu perustuu erilaisiin lisenssi- tai kuukausimaksuihin, ja kustannukset riippuvat tunnisteen määrästä. Taulukossa 5 on esitetty kaupallisten toimijoiden radioaaltoihin perustuvien pääpaikannustekniikoiden keskimääräinen paikannustarkkuus ja toteutuskustannusten suhteellinen vertailu.

Taulukko 5. Työssä esitettyjen pääpaikannustekniikoiden keskimääräinen tarkkuus ja suhteelliset toteutuskustannukset [1, s. 28; 11, s. 49–56; 21, 41, 45, 50]

Tekniikka	Tarkkuus	Kustannukset
WLAN	3 – 7 m	matala
Bluetooth Low Energy	3 – 7 m	matala–keskitaso
Ultra Wideband	0,5 – 1 m	keskitaso–korkea

Tulevaisuuden kehitys voi muuttaa merkittävästi sisätilapaikannukseen käytettävää tekniikkaa ja työssä esitetyt järjestelmät eivät välttämättä pysty enää kilpailemaan kustannustehokkaampien ja tarkempien järjestelmien kanssa.

10 Yhteenveto

Kaupallisten sisätilapaikannusjärjestelmien markkinaosuudesta kilpailee työn kirjoitushetkellä yli 200 yritystä, ja käytettävien paikannustekniikoiden kirjo on laaja. Kuten aiemmin on todettu, ei sisätilapaikannukseen ole vakiintunut yhtä oikeaa tekniikkaa, vaan vallittavana on joukko erilaisia paikannustekniikoita. Sopiva tekniikka riippuu (1) vaaditusta paikannustarkkuudesta, (2) muista paikannuksen teknisistä vaatimuksista, (3) tilan geometriasta ja rakennemateriaaleista.

Tarkan paikannuksen aikaansaamiseksi on käytännöllistä ja kustannustehokasta yhdistää eri tekniikoita. Huone- ja kerrostasoinen paikannustarkkuus voidaan saavuttaa kustannustehokkaasti esimerkiksi optimoimalla rakennuksen WLAN-infrastruktuuri paikannuskäyttöön, ja yhdistämällä järjestelmään rakenteita läpäisemättömät huonekohtaiset lisäpaikantimet.

Suomalaisen IndoorAtlas -yrityksen kehittämä magneettinen paikannus on mielenkiintoinen innovaatio edulliseen vastaanotininfrastruktuurittomaan sisätilapaikannukseen, ja jos tekniikka kehittyy merkittävästi se voisi olla todellinen sisätilapaikannuksen GPS. [51.]

Kehitteillä oleva 5G-mobiiliverkon suunnitellaan tarjoavan 10–100 -kertaisen tiedonsiirtonopeuden käyttäjälle, 1000-kertaisen datavolyymien per alue, 10–100 -kertaa suuremman laitekapasiteetin ja 10-kertaisen akunkestoisuuden verrattuna nykyiseen 4G-verkoon. Se kykenisi < 1 m:n paikannustarkkuuteen sisätiloissa ja 1–10 m:n tarkkuuteen 80% varmuudella ulkotiloissa. Jos 5G-verkko lunastaa odotukset, voisi sen olettaa ottavan paalupaikan sisätilapaikannukseen käytettyjen tekniikoiden joukossa. Yhdistämällä GPS- ja 5G-tekniikat voitaneen saavuttaa saumaton ja tarkka sisätila- ja ulkoaluepaikannukseen soveltuva hybridi. 5G-verkon arvioidaan siirtyvän yleiseen käyttöön vuoden 2020 aikana. [1, s. 157; 52.]

Insinööri työ toimii poikkileikkauksena kirjoitushetkellä tarjolla oleviin reaaliaikaisiin sisätilapaikannusteknologioihin teknisen suorituskyvyn ja toimintaperiaatteiden näkökulmista. Työssä ei päästy käytännössä mittaamaan käytössä olevien paikannusjärjestelmien toimintaa, ja työssä esitetyt faktat perustuvat pääasiassa tekniikoiden teoreettiseen tarkasteluun, järjestelmätoimittajien ilmoittamiin tietoihin ja muihin aiheeseen liittyviin tutkimuksiin.

Useimpien paikannusjärjestelmien kustannukset eivät ole julkista tietoa, ja kustannusrakenteiden osalta tuloksena saatiin karkea suhteellinen arvio eri tekniikoiden toteutuskustannusten välillä. Absoluuttisia hintoja ei kyetty kattavasti eri järjestelmille selvittämään.

Lähteet

- 1 Laitinen, Elina. 2017. Physical Layer Challenges and Solutions in Seamless Positioning via GNSS, Cellular and WLAN Systems. Verkkodokumentti. Tampere University of Technology. <[https://tutcris.tut.fi/portal/fi/publications/physical-layer-challenges-and-solutions-in-seamless-positioning-via-gnss-cellular-and-wlan-systems\(1cd0e1a0-9d2c-4cc7-89b7-2c732ad69058\).html](https://tutcris.tut.fi/portal/fi/publications/physical-layer-challenges-and-solutions-in-seamless-positioning-via-gnss-cellular-and-wlan-systems(1cd0e1a0-9d2c-4cc7-89b7-2c732ad69058).html)>. Luettu 17.8.2017.
- 2 Energiategokkuuden johtava asiantuntija. 2017. Verkkodokumentti. Granlund Oy. <<http://www.granlund.fi/yhtiosta/>>. Luettu 30.8.2017.
- 3 Abdulrahman Alarifi, AbdulMalik Al-Salman, Mansour Alsaleh, Ahmad Al-nafessah, Suheer Al-Hadhrami, Mai A. Al-Ammar, Hend S. Al-Khalifa. 2016. Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances. Verkkodokumentti. National Center for Biotechnology Information. <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4883398/>>. Luettu 20.8.2017.
- 4 Halttu, Sami. 2016. Testilaitteiden paikannusjärjestelmän soveltuvuustutkimus. Verkkodokumentti. Theseus-tietokanta. <<http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/110190/Halttu%20Sami.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Luettu 17.8.2017.
- 5 General Data Protection Regulation. 2017. Verkkodokumentti. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/General_Data_Protection_Regulation>. Luettu 17.8.2017.
- 6 Paikantaminen työelämässä. 2014. Verkkodokumentti. Tietosuojavaltuutetun toimisto. <<http://www.tietosuoja.fi/fi/index/ratkaisut/paikantaminenyoelamassa.html>>. Luettu 2.9.2017.
- 7 Aeroscout RTLS Brochure. 2016. Verkkodokumentti. Stanley Healthcare. <https://www.stanleyhealthcare.com/sites/stanleyhealthcare.com/files/documents/DOC-18-85000-AB_AeroScout%20RTLS%20Brochure.pdf>. Luettu 17.8.2017.
- 8 Radioaallot. 2017. Verkkodokumentti. Wikipedia. <<https://fi.wikipedia.org/wiki/Radioaallot>>. Luettu 17.8.2017.
- 9 Rakennusten sisätiloissa esiintyvien matkapuhelinten kuuluvuusongelmien ratkaisuvaihtoehtojen kartoitus. 2013. Verkkodokumentti. Tampereen Teknillinen Yliopisto. <https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/rakentamisen-kehittaminen/matkapuhelinten_kuuluvuusongelmat_raportti.pdf>. Luettu 17.8.2017.
- 10 8 tyypillistä teollisen WLAN:in ongelmaa. 2016. Verkkodokumentti. Unseen Technologies. <<http://www.unseen.fi/8-tyypillista-wlan-ongelmaa-teollisessa-kaytossa/>>. Luettu 2.9.2017.

- 11 Koskinen, Toni. 2010. UWB in 3D indoor positioning and base station calibration. Verkkodokumentti. Tritonia. <<https://www.tritonia.fi/en/e-theses/abstract/4121/UWB+in+3D+Indoor+Positioning+and+Base+Station+Calibration>>. Luettu 24.8.2017.
- 12 Wireless LAN. 2017. Verkkodokumentti. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_LAN>. Luettu 17.8.2017.
- 13 Bluetooth Low Energy. 2017. Verkkodokumentti. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth_Low_Energy>. Luettu 17.8.2017.
- 14 Zigbee. 2017. Verkkodokumentti. Wikipedia. <<https://en.wikipedia.org/wiki/Zigbee>>. Luettu 17.8.2017.
- 15 dBm. 2017. Verkkodokumentti. Wikipedia. <<https://en.wikipedia.org/wiki/DBm>>. Luettu 17.8.2017.
- 16 WLAN järjestelmän suunnittelu. ei julkaisuvuotta. Notesco. <www.notesco.net/download/WLAN_ohje.pdf>. Luettu 17.8.2017.
- 17 Attenuation. 2017. Verkkodokumentti. Wikipedia. <<https://en.wikipedia.org/wiki/Attenuation>>. Luettu 17.8.2017.
- 18 Signal-to-noise ratio. 2017. Verkkodokumentti. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Signal-to-noise_ratio>. Luettu 17.8.2017.
- 19 Azadeh Kushki, Konstantinos N. Plataniotis, Anastasios N. Venetsanopoulos. 2012. WLAN Positioning Systems: Principles and Applications in Location-Based Services. New York: Cambridge University Press.
- 20 Taajuusjakotaulukko I: 9 - 26175 kHz. 2007. Verkkodokumentti. Viestintävirasto. <www.finlex.fi/data/normit/29042/TJT_suomi.pdf>. Luettu 17.8.2017.
- 21 Karttunen, Jarno. 2017. Key Account Manager SATS - Healthcare & Public Sector, Stanley Security Oy, Helsinki. Tuote-esittely 16.8.2017.
- 22 Ekahau Site Survey. 2017. WLAN-verkon Suunnitteluohjelmisto. Ekahau.
- 23 Spread spectrum. 2017. Verkkodokumentti. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Spread_spectrum>. Luettu 17.8.2017.
- 24 iBeacon Technology and Estimote's Bluetooth Beacons. 2017. Verkkodokumentti. Nanalyze. <<http://www.nanalyze.com/2016/01/ibeacon-technology-and-estimote-bluetooth-beacons/>>. Luettu 17.8.2017.

- 25 Indoor Positioning, Tracking and Indoor Navigation with Beacons. 2017. Verkkodokumentti. Insoft. <<https://www.insoft.com/technology/sensors/bluetooth-low-energy-beacons>>. Luettu 2.9.2017.
- 26 Helakari, Mira. 2017. Sales and Marketing representative, Kaltiot Technologies, Oulu. Tuote-esittely. 29.8.2017.
- 27 Ultra-wideband. 2017. Verkkodokumentti. Wikipedia. <<https://fi.wikipedia.org/wiki/Ultra-wideband>>. Luettu 17.8.2017.
- 28 UWB Technology. 2017. Verkkodokumentti. Sewio. <<http://www.sewio.net/technology/>>. Luettu 17.8.2017.
- 29 RFID. 2017. Verkkodokumentti. Wikipedia. <<https://fi.wikipedia.org/wiki/RFID>>. Luettu 17.8.2017.
- 30 Indoor Localization with RFID. 2017. Verkkodokumentti. Insoft. <<https://www.insoft.com/technology/sensors/rfid>>. Luettu 17.8.2017.
- 31 ZigBee Mesh Topology. 2007. Verkkodokumentti. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/figure/262935147_fig3_Figure-12-ZigBee-Mesh-Topology>. Luettu 2.9.2017.
- 32 Infrared. 2017. Verkkodokumentti. Wikipedia. <<https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared>>. Luettu 17.8.2017.
- 33 Spider henkilöturvajärjestelmä. Ei julkaisuvuotta. Suunnitteluohje. Telepulssi.
- 34 Light. 2017. Verkkodokumentti. Wikipedia. <<https://en.wikipedia.org/wiki/Light>>. Luettu 2.9.2017.
- 35 Nelson, Liz. 2013. What is Visible Light Communication?. Verkkodokumentti. <<http://visiblelightcomm.com/what-is-visible-light-communication-vlc/>>. Luettu 17.8.2017.
- 36 Järvenpää, Janne. 2017. Sisätilapaikannus. Verkkodokumentti. Theseus-tietokanta. <http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/127576/Jarvenpaa_Janne.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. Luettu 17.8.2017.
- 37 IndoorAtlas. 2017. Verkkoartikkeli. IndoorAtlas. <<http://www.indooratlas.com/>>. Luettu 17.8.2017.
- 38 Ultrasound. 2017. Verkkoartikkeli. Wikipedia. <<https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasound>>. Luettu 17.8.2017. Ultrasound. 2017. Verkkoartikkeli. Wikipedia. <<https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasound>>. Luettu 17.8.2017.

- 39 Quick Start: Indoor Positioning Systems. 2017. Verkkoartikkeli. Insoft. <<https://www.infsoft.com/indoor-positioning>>. Luettu 17.8.2017.
- 40 Badges & Tags. 2017. Verkkodokumentti. Stanley Healthcare. <<https://www.stanleyhealthcare.com/technology/badges-tags>>. Luettu 18.8.2017.
- 41 Ekahau RTLS WLAN based Real Time Location and Communication Solution. 2011. Verkkodokumentti. Ekahau. <http://www.infosenseld.com/coma/Collateral%20for%20ALL%20hardware/4_Tracking_Real_Time_Location_Systems/1_Ekahau%20RTLS%20english.pdf>. Luettu 18.8.2017.
- 42 Ekahau Innovation Through Location. 2013. Verkkodokumentti. Ekahau. <[ssty.fi/download/luennot\(2\)/Ekahau_Presentation_UK_2013_Re.pdf](ssty.fi/download/luennot(2)/Ekahau_Presentation_UK_2013_Re.pdf)>. Luettu 18.8.2017.
- 43 9Solutions. 2015. Verkkodokumentti. Easyfairs. <http://www.easyfairs.com/fi/events_216/terveysteknologia-2015_55989/terveysteknologia-2015_56057/naeytteilleasettajat-tuotteet_56107/naeytteilleasettajakatalogi_56110/stand/485060/>. Luettu 2.9.2017.
- 44 Quuppa key features. 2017. Verkkoartikkeli. Quuppa. <<http://quuppa.com/features/>>. Luettu 20.8.2017.
- 45 Quuppa Complete System. 2017. Verkkoartikkeli. Quuppa. <<http://quuppa.com/product/>>. Luettu 20.8.2017.
- 46 Pricing. 2017. Verkkoartikkeli. Kaltiot Technologies. <<https://kaltiot.com/smart-tracker/smart-tracker-prices/>>. Luettu 2.9.2017.
- 47 Dart Ultra Wideband Technology. 2017. Verkkodokumentti. Zebra. <<https://www.zebra.com/us/en/solutions/location-solutions/enabling-technologies/dart-uw.html>>. Luettu 20.8.2017.
- 48 Dimension4 Tag Options. 2017. Verkkodokumentti. Ubisense. <https://ubisense.net/application/files/7314/8551/8964/Dimension4_Tag_Options_Fixed27.01.17.pdf>. Luettu 20.8.2017.
- 49 Dimension4. 2017. Verkkodokumentti. Ubisense. <<https://ubisense.net/en/products/Dimension4>>. Luettu 20.8.2017.
- 50 Selemark, Peter. 2017. Sales & Business Development Executive, Ubisense, Tukholma. Keskustelu 30.8.2017.

- 51 Magnetig Positioning, The Arrival of 'Indoor GPS'. 2014. Verkkodokumentti. Opus Research. <https://www.indooratlas.com/wp-content/uploads/2016/03/magnetic_positioning_opus_jun2014.pdf>. Luettu 18.8.2017.

- 52 Rinta-Tassi, Minna. 2015. Tulevaisuuden 5G-verkko tulee mullistamaan langattoman tiedonsiirron. Verkoartikkeli <<https://yle.fi/uutiset/3-7876044>>. Luettu 18.8.2017.

Paikannusjärjestelmien vertailutaulukko

	Stanley Healthcare Aeroscout	Ekahau RTLS	9Solutions	Quuppa Intelligent Locating System	Kaltiot Smart Tracker	Zebra Dart UWB	Ubisense Dimension4
Paikannustekniikka	WLAN, RFID, ultraääni	WLAN, RFID, infrapuna	Bluetooth Low Energy	Bluetooth Low Energy	Bluetooth Low Energy	Ultra Wideband	Ultra Wideband
Paikannustarkkuus	3-7 m	3-7 m	3-7 m	0,5 m	1-5 m	30 cm	15 cm
Paikannustarkkuus, yhdistetty	huonetaso	< 1 m	huonetaso	-	-	-	-
Kustannukset, pieni kohde	ei ilmoitettu	20 k€ / 100 tunnistetta	ei ilmoitettu	ei ilmoitettu	5 k€ / 50 tunnistetta	ei ilmoitettu	7-10 k€ / 50 tunnistetta
Kustannukset, keskikokoinen kohde	ei ilmoitettu	-	ei ilmoitettu	ei ilmoitettu	3 k€ / kk / 300 tunnistetta*	ei ilmoitettu	20-35 k€ / 300 tunnistetta
Kustannukset, suuri kohde	ei ilmoitettu	200 k€ / +2600 tunnistetta	ei ilmoitettu	ei ilmoitettu	5 k€ / kk / 1000 tunnistetta*	ei ilmoitettu	60-100 k€ / 1000 tunnistetta
Hintaan sisältyy	-	Ohjelmisto ja fyysinen laitteisto	-	-	Ohjelmisto ja tuki tunnisteille	-	Fyysinen laitteisto (ohjelmiston hintaa ei ilmoitettu)
Lisätietoja					*tunnisteet hankittava erikseen		Kustannukset arvioitu järjestelmän laitteiden erillishinnoista.