

Eetu Häkkinen

SISÄTILAPAIKANNUS ÄLYKOTIJÄRJESTELMISSÄ

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Kandidaattitutkielma
Syyskuu 2023

TIIVISTELMÄ

Eetu Häkkinen: Sisätilapaikannus älykotijärjestelmissä
Kandidaattitutkielma
Tampereen yliopisto
Tietotekniikan tutkinto-ohjelma
Syyskuu 2023

Bluetooth ja Wlan ovat radiotaajuisia signaaleja (radio frequency, RF) käyttäviä yhteysteknologioita, joita voidaan hyödyntää sisätilapaikannuksessa. Bluetooth ja Wlan tukevat vastaanotetun signaalitehon (received signal strength, RSS) mittaamista, jonka avulla voidaan selvittää käyttäjälaitteen etäisyys tukiasemasta tai muusta staattisesta lähettimestä. Molemmilla teknologioilla saavutetaan parhaimmillaan alle metrin tarkkuus paikannuksessa hyödyntämällä erilaisia laitteistokonfiguraatioita ja paikannusalgoritmeja.

Tutkielmassa vertaillaan teknologioiden paikannusominaisuuksia sekä laitteiston soveltumista älykotijärjestelmiin. Tutkimuksessa havaittiin, että paikannustarkkuus yltää molemmilla teknologioilla toivotulle tasolle, jotta paikannus eri huoneiden välillä on mahdollista. Bluetooth low energy (BLE) -teknologian säädettävät parametrit ovat eduksi paikantamisessa ja tekevät teknologiasta soveltuvan monenlaisiin käyttöympäristöihin ja paikannustarpeisiin. Skannausintervallia ja -ikkunaa muuttamalla saadaan optimoitua energiankulutusta sekä säädettyä paikannustarkkuutta halutulle tasolle. Wlan-laitteet eivät usein tue signaaliparametrien säätämistä, eikä niissä ole paikannusta varten suunniteltuja ominaisuuksia. BLE-teknologia kuluttaa huomattavasti vähemmän virtaa kuin Wlan-teknologia ja sopii siten paremmin käytettäväksi kannettavissa paikannuslaitteissa sekä asennettuna paikoissa, joissa verkkovirtapistoketta ei ole lähellä. BLE- ja Wlan-paikannuslaitteistot ovat yksinkertaisia ja vaativat vähintään yhden lähetinlaitteen sekä yhden vastaanottimen. BLE-laitteisto on pienemmän kokonsa ansiosta käytännöllisempi kuin Wlan-laitteisto ja se on helpompi asentaa pois näkyvistä.

Molemmat teknologiat toimivat sisätilapaikannuksessa älykotijärjestelmissä, mutta Bluetooth hyötyy BLE:n tarjoamista paikannukseen kohdistuvista optimoinneista ja ominaisuuksista, jotka Wlan-teknologialta puuttuvat. BLE-teknologian korkeampi energiatehokkuus sekä laitteiston alhaisemmat hankintakustannukset ja parempi käytännöllisyys saavat teknologian soveltumaan sisätilapaikannukseen älykotijärjestelmissä paremmin kuin Wlan-teknologian.

Avainsanat: Wlan, Bluetooth, BLE, sisätilapaikannus, älykoti

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto	1
2	Sisätilapaikannus	2
2.1	Teknologiat	2
2.1.1	Bluetooth	2
2.1.2	Wlan	4
2.1.3	Zigbee	4
2.2	Paikannuksen haasteet	5
3	Tekniikat ja algoritmit	6
4	Teknologioiden soveltuvuus älykotijärjestelmiin	7
4.1	Laitteisto	7
4.2	Energiatehokkuus	9
5	Tulokset	11
6	Yhteenveto	12
7	Lähdeluettelo	13

1 Johdanto

Älykotijärjestelmillä voidaan ohjata erilaisia verkkoon yhdistettyjä laitteita ja ohjelmoida automaatioita, jolloin laitteiden hallinta ei vaadi aktiivisia käyttäjän toimenpiteitä. Laitteiden liitettävyyden verkkoon mahdollistaa kodin ohjaamisen etänä. Järjestelmiä voidaan hyödyntää monien toimintojen automatisoimiseen ohjaamalla älykodin laitteita ennalta määritetyillä tavoilla. Ohjattavia laitteita voivat olla muun muassa termostaatit, valaisimet ja pistorasiat. Järjestelmien tarkoituksena on käyttäjien arjen toimenpiteiden helpottaminen erilaisten automaatioiden avulla sekä kodin energiankulutuksen vähentäminen kytkemällä laitteita pois päältä sitä mukaan, kun niitä ei tarvita.

Sisätilapaikannus on tärkeässä roolissa älykotijärjestelmissä, sillä henkilöiden sijaintien selvittäminen kodin sisällä toimii usein olennaisena osana automaatioita. Paikannuksen tavoitteena on selvittää, milloin asukkaat ovat kotona ja mitä huoneita milloinkin käytetään. Sisätilapaikannuksen avulla voidaan automaattisesti hallita älykodin laitteita kullekin asukkaalle optimaalisella tavalla sekä suorittaa haluttuja toimenpiteitä, kun asukkaita ei ole paikalla ollenkaan.

Tämä tutkielma käsittelee laitteellista sisätilapaikannusta, jossa käyttäjällä on mukanaan jokin laite, jonka avulla henkilö voidaan paikantaa. Tutkielman tavoitteena on arvioida Wlan, Bluetooth ja Zigbee-tekniikoiden sekä -laitteiden sopivuutta älykotijärjestelmissä suoritettavaan paikannukseen. Tekniikoista tarkastellaan niiden ominaisuuksia sisätilapaikannuksessa, tekniikoiden vaatimaa laitteistoa sekä muita älykotijärjestelmiin soveltuvuuteen vaikuttavia ominaisuuksia, kuten kustannuksia ja implementoinnin yksinkertaisuutta.

Luku 2 käsittelee Bluetooth, Wlan ja Zigbee-tekniikoiden ominaisuuksia sisätilapaikannuksessa. Luvussa 3 kerrotaan paikannustarkkuuteen vaikuttavista tekijöistä ja tarkkuuden parantamisesta algoritmeilla. Luvussa 4 käsitellään tekniikoiden ja niiden vaatimien laitteistojen soveltuvuutta älykotijärjestelmiin. Luvussa 5 tutkitaan tekniikoiden eroja ja vertaillaan soveltuvuutta älykoteihin.

2 Sisätilapaikannus

Älykotijärjestelmissä paikannuksella tavoitellaan selvittämään asukkaiden sijainnit siten, että järjestelmän laitteita voidaan hallita automaattisesti ja reaaliaikaisesti sijaintien mukaan. Sisätiloissa paikannuksella on erilaisia vaatimuksia, ja ympäristö on hyvin erilainen, kuin ulkona tapahtuvassa paikannuksessa. Sisätiloissa paikannuksen haasteena ovat kaikki esteet, kuten seinät ja huonekalut, jotka vaikuttavat langattomien signaalien etenemiseen. Alue, jolla paikannusta suoritetaan, on rajallinen ja pieni verrattuna ulkona tapahtuvaan paikantamiseen, minkä vuoksi karkealle paikantamiselle ei ole niinkään tarvetta. Sisätilapaikannuksessa usein tavoitellaankin senttimetrin tarkkuuksia.

Sisätilapaikannukseen on kaksi lähestymistapaa: laitteellinen ja laitteeton. Laitteellisessa lähestymistavassa paikannettava kohde kantaa mukanaan tunnistetta, joka lähettää signaaleja, joiden perusteella se voidaan paikantaa. Laitteettomassa lähestymistavassa paikannus tapahtuu analysoimalla lähetinlaitteiden tuottamien signaalien muutoksia ympäristössä eikä paikannettavan kohteen tarvitse pitää mitään laitteita mukanaan. Laitteetonta paikannusta käyttäviä teknologioita ovat muun muassa infrapuna ja ultra-wide-band. Tässä työssä käsitellään laitteellista sisätilapaikannusta. (Mokhtari ym., 2018)

2.1 Teknologiat

Älykotijärjestelmissä haasteita tuottaa paikannus sisätiloissa, sillä perinteiset satelliittipaikannukseen perustuvat teknologiat, kuten Global positioning system (GPS), eivät toimi hyvin sisätilojen NLOS (Non Line Of Sight) -ympäristössä, jossa lähetin ja vastaanotin eivät ole näköyhteydessä keskenään (Ke ym., 2018). GPS:n heikkoutena on myös suuri virrankulutus, jonka vuoksi käyttö läsnäolon tunnistamisessa ei ole järkevää.

Satelliittipaikannusjärjestelmien sijaan sisätilapaikannukseen voidaan käyttää erilaisia radiotaajuisiin (Radio Frequency, RF) signaaleihin perustuvia teknologioita. RF-signaaleihin perustuvia paikannusteknologioita ovat muun muassa ultra-wide-band (UWB), Bluetooth, Wlan, ja Zigbee (Khalajmehrabadi ym., 2017). Radiotaajuisilla signaaleilla käyttäjän laitteen sijaintia voidaan määrittää useilla eri metriikoilla. Tällaisia metriikoita ovat muun muassa vastaanotettu signaaliteho (Received Signal Strength, RSS), signaalin saapumiskulma (Angle of Arrival, AoA), signaalin saapumisaika (Time of Flight, ToF) tai signaalin vaihekulma (Phase of Arrival, PoA) (Zafari ym., 2019). Muita teknologioita, jotka eivät perustu radiotaajuisien signaalien käyttöön, kuten infrapuna, ei käsitellä tässä työssä.

2.1.1 Bluetooth

Bluetooth on langattoman tietoliikenteen teknologia, jota voidaan käyttää paikannukseen sisätiloissa. Teknologia toimii 2,4 GHz:n taajuuskaistalla (Oguntala ym., 2018). Bluetooth low energy (BLE) on Bluetooth 4.0 -versiosta alkaen saatavilla ollut

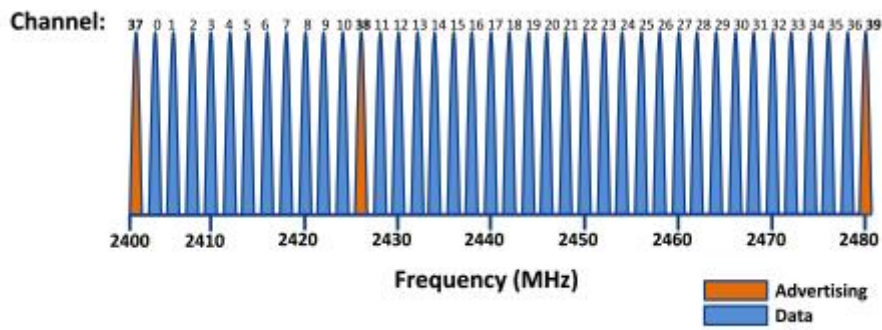
teknologia, joka soveltuu paremmin paikantamiseen kuin muut Bluetooth-yhteydet. BLE-teknologiassa lähetin lähettää valitulla aikavälillä mainossanomaa, ja vastaanottimet mittaavat vastaanottamiensa signaaleiden tehoja (RSS). RSS-arvo kertoo lähettimen etäisyyden vastaanottimesta siten, että pienemmällä RSS-arvolla lähetin on kauempana vastaanottimesta ja suuremmalla arvolla lähempänä. BLE-teknologia tukee paikantamista myös signaalin saapumiskulman ja lähtökulman perusteella. Taulukossa 1 on esitetty useasta tutkimuksesta koostettuna BLE-teknologialla saavutettuja paikannustarkkuuden arvoja.

Taulukko 1. BLE-paikannustarkkuuksia erilaisissa ympäristöissä erilaisilla paikannuskonfiguraatioilla (taulukko muokattu lähteestä (Cantón Paterna ym., 2017)).

Skenaario (m x m)	Majakoiden lukumäärä	Tarkkuus	Käytetty metodi tai algoritmi
10,5 x 15,6	44	96,6 % alle 0,8 m	fingerprinting
16,8 x 12,6	10	90 % alle 4,12 m	fingerprinting
17,5 x 9,6	10	90 % alle ~ 2 m	fingerprinting/syväoppiminen
3,6 x 20	6	90 % alle 2,25 m	fingerprinting/RSS-palautteet

BLE-teknologia toimii sekä yhteydellisessä että yhteydettömässä tilassa. Yhteydellisessä tilassa kahden laitteen välille muodostetaan pysyvä yhteys tiedonsiirtoa varten. Tällainen yhteys on yksityinen yhteysosapuolten välillä. Yhteydettömässä tilassa, jota useimmiten käytetään paikannuksessa, lähetin lähettää mainossanomaa valitulla aikavälillä ja lähetysteholla. Kaikki vastaanottimet voivat vapaasti vastaanottaa sanomia sekä mitata RSS-arvoja. Mainostusintervallia ja lähetystehoja voidaan säädellä paikannustarkkuuden parantamiseksi: mainostusintervalli (advertising interval) määrittää sijainnin päivitystiheyden ja lähetysteho vaikuttaa siihen, mitkä vastaanottimet voivat havaita lähettimen. Vastaanotinpuolella paikannustarkkuuteen vaikutetaan muuttamalla skannausintervallia (scan interval) ja -ikkunaa (scan window). Skannausintervalli määrittää aikavälin, jolla vastaanotin käynnistää uuden skannauksen ja skannausikkuna määrittää ajan, jonka vastaanotin etsii BLE-laitteita jokaisessa skannauksessa (Tosi ym., 2017). Nämä parametrit vaikuttavat suoraan energiatehokkuuteen ja on tarpeen löytää kompromissi virrankulutuksen ja paikannustarkkuuden välillä.

BLE-teknologian käyttämä taajuuskaista välillä 2,4000 GHz–2,4835 GHz on jaettu 40 taajuuskaistaan. Taajuuskaistoista kolme on varattu BLE-mainossanomien lähettämiseen ja muut kaistat tukevat yhteydellisen tilan tiedonsiirtoa. Kanavien jakautuminen on esitetty kuvassa 1. Yksittäinen mainossanoma lähetetään kaikilla kolmella kanavalla samanaikaisesti.



Kuva 1. BLE-taajuuskanavien jakautuminen (Tosi ym., 2017).

2.1.2 Wlan

Wlan-teknologia toimii Bluetoothin tapaan 2,4 GHz:n taajuuskaistalla. Wlan-paikannukseen voidaan käyttää RSS-, ToF- ja AoA-arvoja sekä kanavan tilainformaatiota (Channel State Information, CSI). Wlan-teknologialla voidaan paikantaa laitteen sijainti parhaimmillaan alle metrin tarkkuudella (Bagosi & Baruch, 2011).

2.1.3 Zigbee

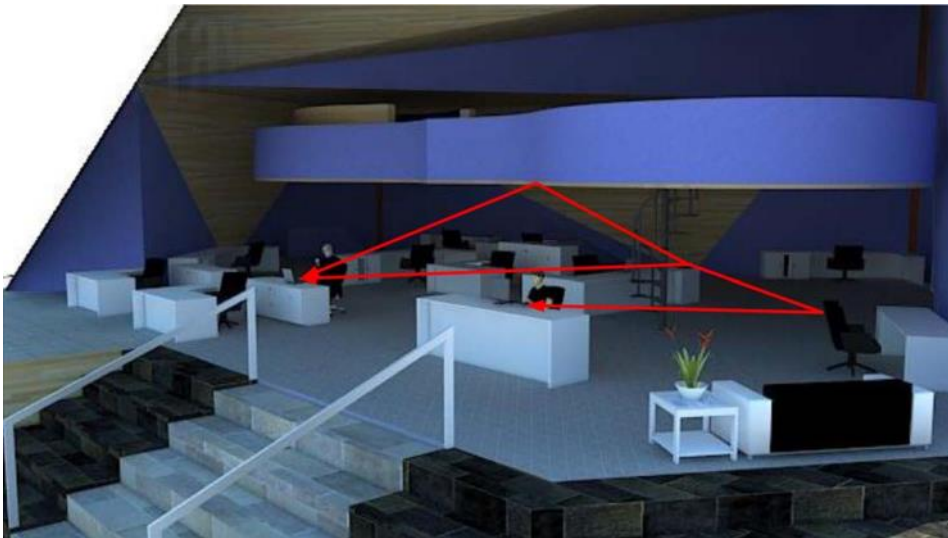
Zigbee on älykotijärjestelmissä laitteidenväliseen kommunikointiin käytettävä teknologia, joka toimii samankaltaisesti kuin muutkin RF-signaaleja hyödyntävät teknologiat. Zigbee-teknologialla Uradzinski ym. (2017) saivat paikannusvirheen keskiarvoksi alle 82 cm. Paikannustarkkuuden parantamiseksi käytettiin fingerprinting-tekniikkaa ja painotetun lähimmän arvon algoritmia. Mittaukset paikannusvirheestä on esitetty taulukossa 2. Zigbee-teknologiaa ei käsitellä tässä työssä enempää, Wlan- ja Bluetooth-teknologiat ovat usein tuettuina laitteissa, joita käyttäjillä on jo ennestään muita tarkoituksia varten. Zigbee-teknologiaa käytetään enimmäkseen Internet of Things-laitteissa sekä älykotiin suunnitelluissa laitteissa.

Taulukko 2. Zigbee-paikannusvirhe x- ja y-suuntiin (taulukko muokattu lähteestä (Uradzinski ym., 2017)).

	dx	dy
Minimi (cm)	4	0
Maksimi (cm)	152	178
Keskiarvo (cm)	78	81
Keskihajonta (cm)	13	51

2.2 Paikannuksen haasteet

RF-signaaleiden käytössä haasteita voivat tuottaa niiden etenemisominaisuudet langattomalla radiotiellä. Erilaiset esteet, joihin signaali törmää, voivat aiheuttaa esimerkiksi häipymistä, heijastumista, sirontaa, taittumista ja monitie-etenemistä (Keränen ym., 2018). Nämä tekijät vaikuttavat RF-signaalien vastaanottoon ja paikannuksen tarkkuuteen sekä luotettavuuteen. Etenemisominaisuudet aiheuttavat samasta sijainnista mitattujen paikannukseen käytettyjen metriikoiden vaihtelua. Esimerkiksi vastaanotettu signaaliteho voi vaihdella riippuen lähetetyn signaalin kulkemasta reitistä sekä reitillä olevista esteistä. Yleisiä signaalin etenemiseen vaikuttavia esteitä ovat seinät, ovet, huonekalut ja ihmiset, joiden vaikutus on havainnollistettu kuvassa 2 (Khalajmehrabadi ym., 2017).



Kuva 2. Paikantamista hankaloittava RF-signaalin monitie-eteneminen (Khalajmehrabadi ym., 2017)

RF-signaaleiden etenemisominaisuudet vaikuttavat paikannustiedon tarkkuuteen sekä luotettavuuteen aiheuttamalla epäjohdonmukaisia metriikoiden mittaustuloksia. Metriikoiden arvojen vaihtelu vaikuttaa eri tavoin eri käyttökohteissa. Jos tavoitteena on tarkka huoneensisäinen paikannus, vaikuttaa esimerkiksi monitie-eteneminen negatiivisesti luotettavuuteen enemmän, kuin silloin, kun tavoitteena on paikantaa vain huoneen tarkkuudella.

3 Tekniikat ja algoritmit

Sisätilapaikantamiseen käytettävien teknologioiden kanssa voidaan käyttää useita metodeja sijainnin määrittämiseksi. Eri menetot eroavat toisistaan paikannustarkkuudessa ja monimutkaisuudessa. Parempaa paikannustarkkuutta tavoiteltaessa käytetään laskentatehoa laitteista mitatun datan käsittelyyn algoritmeilla. Monimutkainen laskenta voidaan siirtää laitteiston ulkopuolelle tehokkaalle palvelimelle (Khalajmehrabadi ym., 2017), jolloin laskennan suorittaminen on nopeampaa eikä se ei kuluta kannettavien laitteiden akkuja.

Eräs tapa selvittää lähettimen sijainti vastaanottimien mittaamista signaalitehoista, on valita tehoista suurin, jolloin lähettimen sijainti määräytyy lähelle sitä vastaanotinta, joka mittasi suurimman vastaanotetun tehon (Mokhtari ym., 2018). Tekniikka on hyvin yksinkertainen, eikä vaadi erillistä laskentaa, mutta yksinkertaisuutensa vuoksi paikannuksen tarkkuus ja luotettavuus ovat heikkoja. Suurimman vastaanotetun tehon tekniikka ei huomioi RF-signaalien etenemiseen liittyvien haasteiden aiheuttamia potentiaalisia virhemittauksia.

Fingerprinting eli radiosormenjälkipaikannus on tekniikka, jolla pyritään parantamaan RSSI-pohjaisen (received signal strength indicator) paikannuksen tarkkuutta hyödyntämällä tietokantaan etukäteen tallennettua dataa. Fingerprinting-tekniikan käyttö koostuu kahdesta vaiheesta: offline-vaiheesta, jossa kerätään dataa tietokantaan. ja online-vaiheesta, jossa tietokannan dataa käytetään paikannuksen tukena. Ensimmäisessä vaiheessa, jota kutsutaan offline-vaiheeksi, tietokantaan tallennetaan paikannettavan laitteen sijainti sekä sitä vastaavat vastaanottimien mittaamat RSSI-arvot. Tätä toimenpidettä toistetaan useita kertoja vaihtaen paikannettavan laitteen sijaintia, jolloin saadaan muodostettua tietokanta, jonka avulla RSSI-arvojen mukaan voidaan selvittää laitteen sijainti. Toisessa vaiheessa eli online-vaiheessa verrataan tietokantaan tallennettuja RSSI-arvoja reaaliajassa mitattuihin RSSI-arvoihin. Tietokannasta etsitään reaaliaikaisia mittauksia parhaiten vastaavat RSSI-arvot ja niihin liitetty sijaintitieto. (Uradzinski ym., 2017)

Fingerprinting-tietokannasta voidaan määrittää laitteen sijainti käyttämällä erilaisia algoritmeja. Lähin naapuri (Nearest Neighbor), K lähin naapuri (K-Nearest-Neighbor) ja painotettu K lähin naapuri (Weighted K-Nearest-Neighbor) ovat deterministisiä algoritmeja, joilla lasketaan mitattujen RSSI-arvojen ja tietokannan arvojen euklidista etäisyyttä toisistaan. Probabilististen algoritmien tavoitteena on selvittää sijainti todennäköisyyksiin perustuen. Probabilistisesti toimivia algoritmeja ovat muun muassa Kernel-menetelmä (kernel method), histogrammimenetelmä ja Markovin piilomalli. (Bagosi & Baruch, 2011)

4 Teknologioiden soveltuvuus älykotijärjestelmiin

Älykoti ympäristönä asettaa vaatimuksia ja haluttuja ominaisuuksia käytetyille läsnäolon tunnistuksen metodeille. Älykotijärjestelmien läsnäolon tunnistuksessa teknologioiden eduksi voidaan nähdä edullisuus, nopeus, luotettavuus, energiatehokkuus ja yksinkertainen laitteisto. Samankaltaisia vaatimuksia on asetettu myös Xiao ym. (2016) tutkimuksessa sisätilapaikannukselle. Näitten parametrien täytyessä saadaan maksimoitua käyttäjän kokema hyöty älykotijärjestelmästä.

Läsnäolon tunnistukseen käytetyn laitteiston monimutkaisuus ja käytön sekä asennuksen haasteet vaikuttavat soveltuvuuteen älykotijärjestelmissä. Älykoteihin ei ole järkevää asentaa suuria laitteistoja ja laitteiden määrä pyritään minimoimaan, sillä älykotijärjestelmän tulisi olla mahdollisimman vähän käyttäjän tiellä ja mahdollisimman vähän näkyvillä, kun se ei ole aktiivisessa käytössä.

4.1 Laitteisto

Wlan on kolmesta tarkastellusta teknologiasta yleisin ja monesta kodista, jossa älykotijärjestelmää rakennetaan, löytyy jo Wlan-tukiasema internet-yhteyttä varten sekä Wlania tukevia kannettavia laitteita, kuten älypuhelimia. Tukiasema on paikannuksessa staattinen laite, eikä se sovi mukana kannettavaksi suuren kokonsa vuoksi sekä siksi, että laitteet käyttävät yleensä verkkovirtaa. Tukiasemat sisältävät paljon ominaisuuksia, joita paikannuksessa ei käytetä, eivätkä tukiasemat yleensä ole kovinkaan edullisia. Useita tukiasemia hankkiessa kokonaiskustannukset voivat olla korkeat, vaikka osaa Wlan-laitteistosta ei tarvitsisi erikseen hankkia. Wlan-teknologia on suunniteltu etupäässä internet-yhteyksiä varten, minkä vuoksi laitteisto ei omaa optimointeja paikannusta varten. Laitteiston optimoimattomuus paikannusta varten näkyy esimerkiksi siten, että kaikki tukiasemat eivät tue lähetystehon säätämistä. Optimoimattomuudestaan huolimatta teknologialla voidaan suorittaa sisätilapaikannusta, joten jos suurin osa laitteistosta löytyy kodista jo valmiina, voi Wlan olla sopiva valinta. (Ho & Chan, 2020)

BLE-teknologian käyttämä laitteisto on Wlanin tapaan yksinkertainen. BLE:n käyttö paikannuksessa vaatii vähintään yhden vastaanottimen ja lähettimen. Laittevaihtoehtoja on monia Bluetooth-teknologian yleisyyden vuoksi. Vastaanottimena voidaan käyttää esimerkiksi tietokonetta tai älypuhelinia, jossa on Bluetooth-ominaisuus. Mikäli vastaanottimia tarvitaan useita, esimerkiksi paikannukseen huoneen tarkkuudella, voidaan vastaanottimina käyttää erilaisia mikrokontrollereita. Bluetoothilla varustetut mikrokontrollerit ovat halpoja, energiatehokkaita sekä kooltaan pieniä, joten ne sopivat hyvin käyttöön älykodeissa. Lähettiminä käytetään BLE-tunnisteita, jotka ovat pieniä paristokäyttöisiä laitteita, joiden edullisuus lisää soveltuvuutta älykotijärjestelmiin. Tunnistetta on tarkoitus kantaa mukana asukkaan sijainnin selvittämiseksi, joten laitteen

pieni koko on tärkeää käytännöllisyyden näkökulmasta. Erilaisia BLE-tunnisteena käytettäviä laitteita ja niiden ominaisuuksia on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Puettavien BLE-tunnisteiden ominaisuuksia (muokattu lähteestä (Bai ym., 2020)).

Tunnisteen tyyppi	Keskimääräinen mainostusintervalli (s)	Hinta (£)	Paikannustarkkuus	Akun kesto
Jalee Beacon (black)	2,24	£10	96,7 %	Noin 1 vuosi
Estimote (Beacon Mint)	1,80	£15	96,3 %	Noin 2 vuotta
Lem wrist band (basic version)	4,03	£2	94,8 %	15 päivää
Mi band 1	4,11	£8	95,3 %	30 päivää
Mi band 2	6,04	£16	99,74 %	20 päivää
Fitbit Surge	2,72	£145	88,17 %	7 päivää

BLE-paikantamisessa sekä vastaanottimia että lähettämiä voidaan käyttää kahdessa eri roolissa: liikkuvina tai staattisina laitteina. Staattisina laitteina vastaanottimet skannaavat liikkuvasta BLE-tunnisteesta saapuvaa signaalia. Vastaanottimet voivat myös suorittaa signaalin prosessointia tai vain välittää Bluetooth-dataa keskitettyyn prosessointiyksikköön, kuten palvelimeen. Vastaanotinta voidaan käyttää myös liikkuvana laitteena, jolloin se skannaa paikallaan pysyvien BLE-tunnisteiden lähettämiä signaaleja. Vastaanottimen suorittama signaalin prosessointi tai datan välittäminen kuluttaa virtaa, joten sen käyttäminen akkukäyttöisenä liikkuvana laitteena ei välttämättä ole vaihtoehtoista paras.

Yksittäisten Wlan-tukiasemien hankintakustannukset ovat kesäkuussa 2023 tehtyjen internethakujen mukaan ovat halvimmillaan noin 20 euroa. Taulukosta 3 ilmenee erilaisten BLE-laitteiden hankintakustannuksia, joista huomataan useimpien laitteiden kustannusten jäävän alle 20 punnan eli suurin osa laitteista on edullisempia kuin Wlan-laitteet.

4.2 Energiatehokkuus

Energiatehokkuus on tärkeä aspekti älykotijärjestelmissä. Yleisenä tavoitteena älykotijärjestelmissä on vähentää kodin energiankulutusta, joten älykotijärjestelmien älylaitteiden tulisi kuluttaa myös mahdollisimman vähän virtaa. Toinen syy hyvän energiatehokkuuden tavoitteluun on kannettavien ja akku- tai paristokäyttöisten laitteiden käyttö. Älykotijärjestelmän laitteiden määrän kasvaessa ei ole käytännöllistä joutua vaihtamaan paristoja tai lataamaan akkuja usein. Esimerkkinä virrankulutuksen minimoinnin tarpeesta toimii älypuhelimien käyttäminen sisätilapaikannuksessa. Mukana kannettavaa älypuhelimia käytetään samanaikaisesti myös muihin toimintoihin ja suurentunut virrankulutus haittaa siis myös laitteen muuta käyttöä.

Pysyvän yhteyden ylläpitäminen kuluttaa enemmän virtaa kuin yhteydettömän tilan käyttäminen, eikä BLE-paikantaminen vaadi yhteydellisen tilan ominaisuuksia. Mainossanomien aikaväli ja lähetysteho vaikuttavat BLE-lähettimen virrankulutukseen siten, että aikaväliä kasvattaessa ja lähetystehoa laskiessa virrankulutus laskee. Taulukoissa 5 ja 6 on esitetty lähettimen virrankulutus eri mainostusintervalleilla 3 V:n virtalähteellä.

Taulukko 5. Yhteydettömässä tilassa toimivan BLE-lähettimen virrankulutus 100 ms:n mainostusintervallilla ja 5 dBm:n lähetysteholla kolmea kanavaa käytettäessä (taulukko muokattu lähteestä (Cantón Paterna ym., 2017)).

Käyttöaika (pv)	Huippuvirta (mA)	Virran keskiarvo (mA)
53,138	9,3	0,18035

Taulukko 6. Yhteydettömässä tilassa toimivan BLE-lähettimen virrankulutus 500 ms:n mainostusintervallilla ja 5 dBm:n lähetysteholla kolmea kanavaa käytettäessä (taulukko muokattu lähteestä (Cantón Paterna ym., 2017)).

Käyttöaika (pv)	Huippuvirta (mA)	Virran keskiarvo (mA)
259,923	9,3	0,03687

Wlan-tekniikan energiatehokkuus vaihtelee Wlan-laitteiston tilan sekä käytetyn kaistanleveyden ja yhteystyyppin mukaan. Tehonkulutuksen arvoja on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Wlan tehonkulutus eri tiloissa (taulukko muokattu lähteestä (Tuysuz, 2018)).

Tila	Tehonkulutus (W)
Lähetys (IEEE 802.11a/b/g) 20 MHz	1,3
Toimeton (IEEE 802.11a/b/g) 20 MHz	0,74
Vastaanotto (IEEE 802.11a/b/g) 20 MHz	0,9
Nukkuminen (IEEE 802.11a/b/g) 20 MHz	0,045
Lähetys (IEEE 802.11ac) 20/40/80 MHz	1,9/2,2/2,5
Toimeton (IEEE 802.11ac) 20/40/80 MHz	0,58/0,66/0,82
Vastaanotto (IEEE 802.11ac) 20/40/80 MHz	1/1,2/1,5
Nukkuminen (IEEE 802.11ac) 20/40/80 MHz	0,19/0,22/0,24

5 Tulokset

Sekä Bluetooth- että Wlan-tekniikan tarjoama paikannustarkkuus sisätiloissa riittää älykotijärjestelmissä, joissa tarvitaan paikannusta huonetasolla. Bluetooth-yhteyden lyhyt kantama on etuna ympäristöissä, joissa halutaan sijoittaa useita laitteita lähekkäin pienelle alueelle.

Bluetooth-paikannuksen vaatiman laitteiston hankintakustannukset ovat Wlan-laitteistoon verrattuna edulliset. Bluetooth-laitteisto on pienikokoisempi kuin Wlan-laitteisto ja se on helpompi asentaa siten, että laitteisto ei ole lainkaan kodissa näkyvässä. Pienempi koko on eduksi myös laitteessa, jota käyttäjä kantaa mukanaan paikantamistarkoituksessa.

Bluetooth- ja Wlan-tekniikoiden energiatehokkuudet myös eroavat merkittävästi. BLE-tekniikan keskimääräiseksi tehonkulutukseksi saadaan Cantón Paterna ym. (2017) tutkimuksen perusteella parhaimmillaan 0,11 mW. Wlan-tekniikka kuluttaa nukkumistilassakin vähintään 45 mW, joten BLE on selkeästi energiatehokkuudessa paremmalla tasolla. BLE-yhteystyyppi toimii hyvin kannettavien akku- ja paristokäyttöisten laitteiden kanssa ja matalan virrankulutuksen myötä vähentää laitteiden ylläpidon tarvetta. Wlanin suurempi virrankulutus vähentää laitteiston käytännöllisyyttä ja rajoittaa asennusmahdollisuuksia, mikäli tukiasema toimii verkkovirralla.

6 Yhteenveto

Molemmat teknologiat toimivat sisätilapaikannuksessa työssä esitettyjen kriteerien mukaisesti. Älykotijärjestelmiin sovellettuna Bluetooth tarjoaa enemmän etuja kuin Wlan. Paikannustarkkuudessa tai luotettavuudessa ei teknologioiden välillä havaittu merkittäviä eroja, joten nämä eivät ole merkittäviä tekijöitä sopivan teknologian valinnassa. Todennäköisimmin käyttäjien tekemiin valintoihin vaikuttavat enimmäkseen laitteiden hankintakustannukset sekä se, mitä laitteita käyttäjällä on jo hankittuna ennestään.

Molempien teknologioiden säädettävät parametrit huomattiin tarjoavan mahdollisuuden vaikuttaa merkittävästi teknologian paikannustarkkuuteen ja virrankulutukseen. Kuten Cantón Paternan ym. (2017) sekä Tuysuzin (2018) mittaustuloksista havaittiin, on molemmilla teknologioilla niin alhainen virrankulutus, että verkkovirtaan kytkettyinä laitteet voidaan optimoida parhaalle paikannustarkkuudelle ja -nopeudelle. Liian matalalla paikannustarkkuudella tai -nopeudella käyttäjä voisikin kokea älykotijärjestelmän epäkäytännölliseksi.

Tarkasteltuina olleista tutkimuksista ei löytynyt merkittäviä RF-signaalien etenemisominaisuuksien vaikutusten vähentämiseen tarkoitettuja menetelmiä. Etenkin RSSI-mittauksia käytettävässä paikannuksessa havaitaan signaalien etenemisominaisuuksista johtuvaa paikannuksen epätarkkuutta ja epäluotettavuutta. Älykotijärjestelmien käyttöympäristöjen moninaisuus johtaa RF-signaalien etenemisominaisuuksien vaihteleviin vaikutuksiin.

Sisätilapaikannukseen käytettäviä laitteettomia teknologioita ei käsitelty tarkemmin tässä tutkielmassa, mutta niiden potentiaali paremmassa käytännöllisyydessä laitteellisiin teknologioihin verrattuna toimii etuna älykotijärjestelmissä ja on mahdollinen jatkotutkimusaihe. Tutkimusta voisi jatkaa myös lisäämällä vertailuun ja Zigbee-teknologian, jonka potentiaali sisätilapaikantamisessa havaittiin tarkastelemalla teknologian saavuttamaa paikannustarkkuutta. Zigbee on myös älykotijärjestelmissä yleisesti käytettävä teknologia, joka mahdollistaa vähäiset käyttöönottokustannukset.

7 Lähdeluettelo

- Bagosi, T., & Baruch, Z. (2011). Indoor localization by WiFi. *2011 IEEE 7th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing*, 449–452. <https://doi.org/10.1109/ICCP.2011.6047914>
- Bai, L., Ciravegna, F., Bond, R., & Mulvenna, M. (2020). A Low Cost Indoor Positioning System Using Bluetooth Low Energy. *IEEE Access*, 8, 136858–136871. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3012342>
- Cantón Paterna, V., Calveras Augé, A., Paradells Aspás, J., & Pérez Bullones, M. (2017). A Bluetooth Low Energy Indoor Positioning System with Channel Diversity, Weighted Trilateration and Kalman Filtering. *Sensors*, 17(12), 2927. <https://doi.org/10.3390/s17122927>
- Ho, Y. H., & Chan, H. C. B. (2020). Decentralized adaptive indoor positioning protocol using Bluetooth Low Energy. *Computer Communications*, 159, 231–244. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.04.041>
- Ke, C., Wu, M., Chan, Y., & Lu, K. (2018). Developing a BLE Beacon-Based Location System Using Location Fingerprint Positioning for Smart Home Power Management. *Energies*, 11(12), 3464. <https://doi.org/10.3390/en11123464>
- Khalajmehrabadi, A., Gatsis, N., & Akopian, D. (2017). Modern WLAN Fingerprinting Indoor Positioning Methods and Deployment Challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 19(3), 1974–2002. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2671454>
- Mokhtari, G., Anvari-Moghaddam, A., Zhang, Q., & Karunanithi, M. (2018). Multi-Residential Activity Labelling in Smart Homes with Wearable Tags Using BLE Technology. *Sensors*, 18(3), 908. <https://doi.org/10.3390/s18030908>

- Oguntala, G., Abd-Alhameed, R., Jones, S., Noras, J., Patwary, M., & Rodriguez, J. (2018). Indoor location identification technologies for real-time IoT-based applications: An inclusive survey. *Computer Science Review*, *30*, 55–79. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2018.09.001>
- Tosi, J., Taffoni, F., Santacatterina, M., Sannino, R., & Formica, D. (2017). Performance Evaluation of Bluetooth Low Energy: A Systematic Review. *Sensors*, *17*(12), 2898. <https://doi.org/10.3390/s17122898>
- Tuysuz, M. F. (2018). Towards providing optimal energy-efficiency and throughput for IEEE 802.11 WLANs. *International Journal of Communication Systems*, *31*(13), e3725. <https://doi.org/10.1002/dac.3725>
- Uradzinski, M., Guo, H., Liu, X., & Yu, M. (2017). Advanced Indoor Positioning Using Zigbee Wireless Technology. *Wireless Personal Communications*, *97*(4), 6509–6518. <https://doi.org/10.1007/s11277-017-4852-5>
- Xiao, J., Zhou, Z., Yi, Y., & Ni, L. (2016). A Survey on Wireless Indoor Localization from the Device Perspective. *ACM computing surveys*, *49*(2), 1–31. <https://doi.org/10.1145/2933232>
- Zafari, F., Gkelias, A., & Leung, K. K. (2019). A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, *21*(3), 2568–2599. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2911558>