

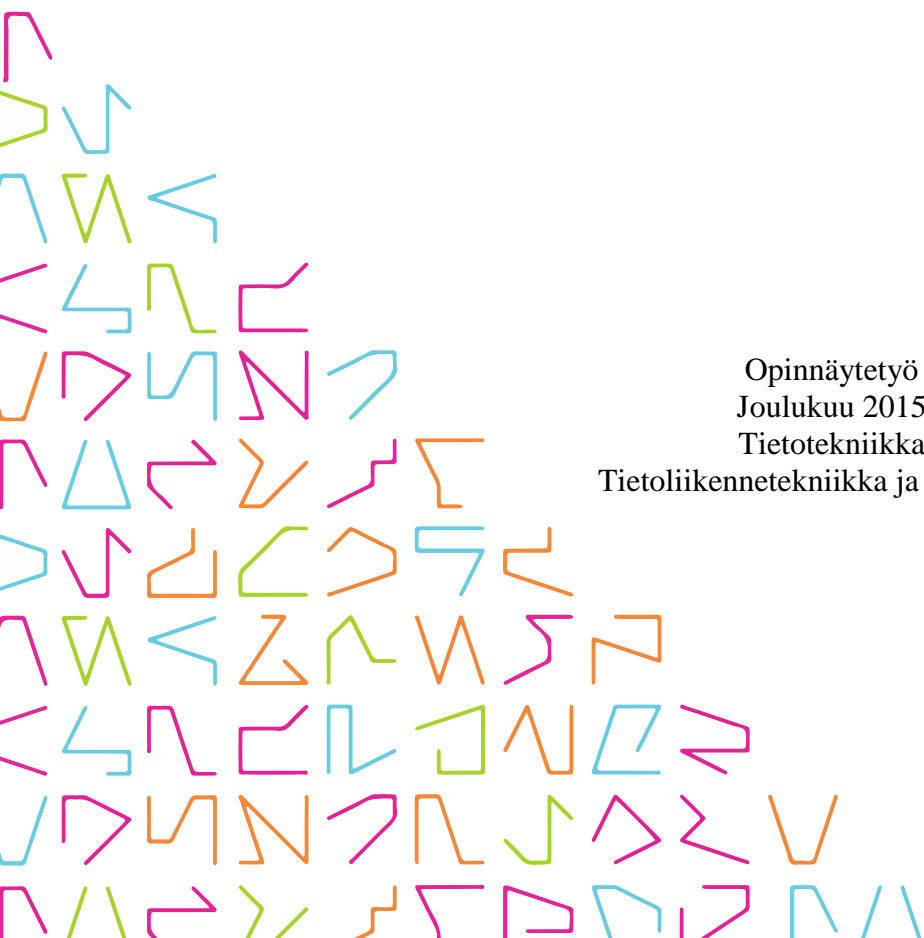


TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

ULTRA WIDEBAND -TEKNIIKAN OMINAISUUDET JA MAHDOLLISUUDET

Jaakko Heinisuo

Opinnäytetyö
Joulukuu 2015
Tietotekniikka
Tietoliikennetekniikka ja tietoverkot



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tietotekniikan koulutusohjelma
Tietoliikennetekniikka ja tietoverkot

HEINISUO, JAAKKO:

Ultra Wideband -tekniikan ominaisuudet ja mahdollisuudet

Opinnäytetyö 29 sivua
Joulukuu 2015

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä Ultra Wideband -tekniikkaan ja sen tulevaisuuteen ja mahdollisuuksiin.

Ultra Wideband eli UWB on langaton tiedonsiirtotekniikka, jonka vahvuuksiin kuuluvat erittäin korkea tiedonsiirtonopeus lyhyillä etäisyyksillä ja pieni energiankulutus. UWB toimii WPAN-verkossa ja se soveltuu erinomaisesti kodin elektroniikan yhdistämiseen langattomasti ja langattoman multimedian siirtoon kuin myös tarkkaan sisätilan paikannukseen.

UWB-tekniikka käyttää perinteisiin langattomiin tiedonsiirtotekniikoihin verrattuna erittäin laajaa radiotaajuusaluetta pienellä lähetysteholla. Ultra Wideband -signaali on muiden laitteiden näkökulmasta pelkkää kohinaa, joten tämän vuoksi sitä voidaan käyttää samoilla taajuusalueilla kuin muita tekniikoita. UWB-tekniikan suurin haaste on standardien puute. Mikäli yhteiset säännöt tekniikasta ja taajuuksien jaosta saataisiin aikaan, olisi sille lukemattomia sovellusmahdollisuuksia.

Aluksi työssä käydään lyhyesti läpi UWB:n historiaa. Tämän jälkeen siirrytään itse tekniikkaan, jonka lomassa tuodaan ilmi tekniikan vahvuuksia ja haasteita verrattuna muihin langattomiin tiedonsiirtotekniikoihin. Ensimmäiseksi luodaan katsaus UWB:n ominaisuuksiin ja vahvuuksiin yleisesti ja tämän jälkeen siirrytään signaalin määrittelyyn sekä taajuusjako- ja tehotasorajoituksiin. Seuraavaksi käsitellään tekniikan toimintaperiaatteita, toteutusta ja antennin vaatimuksia. Lopuksi pohditaan vielä UWB-tekniikan sovelluskohteita, mahdollisuuksia ja tulevaisuutta.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in ICT Engineering
Telecommunications and Networks

HEINISUO, JAAKKO:

The Features and Possibilities of Ultra Wideband Technology

Bachelor's thesis 29 pages

December 2015

The purpose of this thesis was to explore Ultra Wideband technology and its future and possibilities.

Ultra Wideband, also known as UWB, is a wireless radio technology of which advantages are a very high data transfer rate at short range and small power consumption. UWB operates in wireless personal area network (WPAN) and it is exceptional in connecting consumer electronics and in transferring multimedia. It can also be used as an indoor alternative to Global Positioning System (GPS).

Unlike conventional radio technologies, which operate within a relatively narrow bandwidth, the UWB operates across a wide range of the frequency spectrum using low transmit power. Because of the low power it is said that UWB signal is hiding in the noise floor of the spectrum and hence not interfering with the traditional radio systems that operate on the same spectrum. The biggest challenge for Ultra Wideband technology is the absence of standards. If global rules were achieved, UWB would have countless application possibilities.

At the beginning the work describes briefly the history of Ultra Wideband. After that the technology itself is explored with its advantages and challenges compared to conventional radio technologies. First there is an overview of the features of the UWB followed by signal specifications, radio frequency spectrum limitations and power restrictions. Next the theory of operation, implementation and antenna requirements are covered. Finally thesis takes a look at the applications, possibilities and future of the UWB technology.

Key words: uwb, ultra wideband, wireless, wpan

SISÄLLYS

| | | |
|---|--|----|
| 1 | JOHDANTO..... | 6 |
| 2 | LANGATTOMAN TIEDONSIIRRON KEHITTYMINEN..... | 7 |
| 3 | ULTRA WIDEBAND -TEKNIikka..... | 9 |
| | 3.1 UWB-teknikka yleisesti..... | 9 |
| | 3.2 Signaalin määrittelyt ja rajoitukset | 13 |
| | 3.3 Toimintaperiaate | 17 |
| | 3.4 Toteutus | 20 |
| | 3.5 Antenni..... | 22 |
| 4 | SOVELLUSKOHTEET | 25 |
| 5 | POHDINTA..... | 27 |
| | LÄHTEET..... | 28 |

LYHENTEET JA TERMIT

| | |
|---------|--|
| BER | Bit Error Ratio; bittivirhesuhde |
| CMOS | Complementary Metal Oxide Semiconductor; kanavatransistoreihin perustuva mikropiiritekniikka |
| DAA | Detect and Avoid; häiriönlievennystekniikka |
| FCC | Federal Communications Commission; Yhdysvaltain tietoliikennekomissio |
| EIRP | Effective Isotropic Radiated Power; isotrooppisen antennin säteilyteho |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers; kansainvälinen tekniikan alan järjestö |
| LDC | Low Duty Cycle; häiriönlievennystekniikka |
| MAC | Media Access Control; IEEE-verkoissa verkon varaamisen ja itse liikennöinnin hoitava osajärjestelmä |
| MB-OFDM | Multi-Band Orthogonal Frequency-Division Multiplexing; monikantoaaltomodulaatio |
| NB | Narrow Band; kapeakaistainen |
| SS | Spread Spectrum; hajaspektri |
| USB | Universal Serial Bus; sarjaväyläarkkitehtuuri oheislaitteiden liittämiseksi tietokoneeseen |
| UWB | Ultra Wideband; erittäin laajakaistainen tiedonsiirtotekniikka |
| WLAN | Wireless Local Area Network; langaton lähiverkko |
| WPAN | Wireless Personal Area Network; langaton likiverkko |
| WUSB | Wireless Universal Serial Bus; langaton sarjaväyläarkkitehtuuri oheislaitteiden liittämiseksi tietokoneeseen |

1 JOHDANTO

Jatkuvasti kehittyvä tarve suuremmille ja suuremmille tiedonsiirtomäärille ja täten tiedonsiirtonopeuksille on luonut markkinoille tarpeen entistäkin nopeammille tiedonsiirtoyhteisyyksille. Kehittyvän tekniikan, niin viihde- kuin hyötykäyttöön tehdyn, ei enää haluta olevan riippuvainen pelkästään erittäin nopeista, mutta langallisista yhteyksistä.

Tähän kasvavaan nopean langattoman yhteyden tarpeeseen alettiin 2000-luvun alussa kehittää huomattavasti silloisia langattomia tekniikoita (esim. WLAN ja Bluetooth) nopeampaa UWB- eli Ultra Wideband -tekniikkaa, joka perustuu hyvin laajaan käytettävissä olevaan kaistaan. Tekniikalla on mahdollista saavuttaa erittäin nopea siirtonopeus vähäisellä tehonkulutuksella.

UWB-tekniikkaa on kehitetty erityisesti lyhyiden etäisyyksien todella nopeaan tiedonsiirtoon esimerkiksi kodin elektroniikan välillä. Sillä voidaankin luoda WPAN- (Wireless Personal Area Network) eli langaton likiverkko, joka tarkoittaa käytännössä kotitai toimistoympäristöä. UWB-tekniikkaa käytetään myös langattomassa USB:ssa eli WUSB:ssa, joka onkin tämän hetken laajimmalle levinneitä UWB-sovellutuksia.

UWB ei kuitenkaan ole vielä lyönyt itseään täysillä läpi ja suurin syy tähän on standardoinnin hitaus, sillä tekniikalle ei vieläkään löydy yhteistä standardia. Markkinoilla oleva tarve nopealle ja langattomalle lyhyen kantaman tiedonsiirtotekniikalle sekä vartenotettavien kilpailevien tekniikoiden puuttuminen kuitenkin takaa, että kiinnostus UWB-tekniikkaan säilyy ainakin jossain määrin ja sitä tultaneen kehittämään jatkossakin.

Kun kuulin ensimmäisen kerran UWB-tekniikasta, kiinnostukseni heräsi sen muista langattomista tekniikoista poikkeavien ominaisuuksien ja toimintaperiaatteen vuoksi. Halusin tietää tekniikasta lisää ja valitsin sen opinnäytetyöni aiheeksi. Aloittaessani tietämykseni Ultra Wideband -tekniikasta oli erittäin vähäinen. Tässä opinnäytetyössä perehdytään Ultra Wideband -tekniikan ominaisuuksiin ja mahdollisuuksiin sekä selvitetään sen vahvuuksia ja haasteita verrattuna muihin langattomiin tiedonsiirtotekniikoihin. Tarkoitus on luoda yleiskatsaus UWB-tekniikkaan menemättä kuitenkaan liian syvälle yksityiskohtiin.

2 LANGATTOMAN TIEDONSIIRRON KEHITTYMINEN

Viime vuosikymmenen lopulla langattomuus alkoi lisääntyä kuluttajaelektronikassa. Ensin tulivat langattomat puhelimet ja vuosikymmenen vaihteessa yrityksiin ja koteihin alkoi ilmestyä langallisten lähiverkkojen tueksi langattomia lähiverkkoja. Tästä eteenpäin langattomuus on ottanut jatkuvasti edistysaskelia ja langatonta viihde- ja hyötyelektronikkaa on kehitetty mm. langattomien näppäimistöjen, hiirien ja kuulokkeiden muodossa. Langattoman lähiverkon tueksi on luotu lyhyen kantaman pienitehoisempia ja yksinkertaisempia tekniikoita laitteisiin joiden kanssa halutaan liikkua ja joiden koko halutaan pitää pienenä. Esimerkki tällaisesta tekniikasta on Bluetooth. Nämä tekniikat ovat kuitenkin vielä langallisiin verkkoihin tai WLAN:iin verrattuna hitaita, joten tiedonsiirtonopeuden tarpeen jatkuvasti noustessa olisi lyhyen kantaman erittäin nopealle ja mobiilille tekniikalle tarvetta. Juuri näillä alueilla on Ultra Wideband -tekniikan vahvuudet ja sillä on mahdollisuudet todelliseen läpimurtoon elektronikan langattomassa yhdistämisessä.

UWB-tekniikan historian voidaan katsoa alkaneeksi samaan aikaan kuin radiolähetysten historian eli jo 1800-luvun lopulta. Tuolloin Guglielmo Marconin kehittämä kipinäväliin perustuva langaton lennätin lähetti lyhyitä pulsseja joiden spektri ulottui laajalle taajuusalueelle. Tämä tekniikka oli alkusysäys radion kehittämiseksi, ja tämän takia Marconia pidetäänkin radion ja tutkan keksijänä. Marconi oli oleellisessa asemassa myös tutkan kehittämisessä ja vaikka hänen panoksensa edellä mainittujen keksintöjen syntyyn on kiistaton, pitää muistaa, että ilman edeltäjiensä työtä hän tuskin olisi onnistunut. (Granlund 2001, 5–7; Nikookar & Prasad 2009, 1–7; Prossori: UWB-tekniikka 2004.)

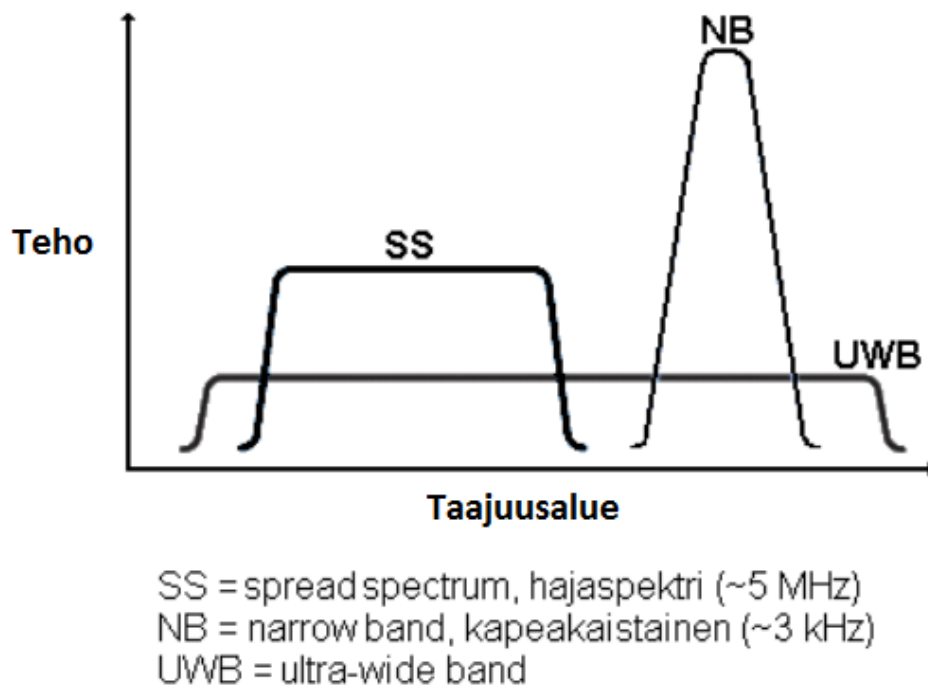
Varsinaisesti UWB-tekniikka (joskin tätä termiä ei vielä tunnettu) itsessään sai alkunsa 1960–1970 -luvulla, kun Gerald F. Ross keksi toteutuksen, jonka avulla voidaan hyödyntää ultralaajakaistaista aaltomuotoa radioaaltojen tutka- ja tietoliikennesovelluksissa. UWB-tekniikan mahdollisuuksia markkinoilla alettiin tutkia kuitenkin vasta 1990-luvulla, kun professori Robert A. Scholtzin johdolla kehitettiin hyvin lyhyiden, aika-amplitudi- tai vaihemoduloitujen pulssien lähettämiseen perustuvaa impulssiradiotekniikkaa. (Nikookar & Prasad 2009, 1–7; Prossori: UWB-tekniikka 2004.)

Varsinainen laajamittainen UWB-tekniikan tutkimus alkoi vuonna 2002 Yhdysvaltain tietoliikennekomission FCC:n (Federal Communications Commission) päättäessä, että 3,1–10,6 GHz taajuuskaista tullaan antamaan UWB:n käyttöön. Seuraavan vuoden alussa perustettiin työryhmä (TG3a), jonka tarkoitus oli standardoida UWB-tekniikka. Työryhmä ei kuitenkaan päässyt yksimielisyyteen kahdesta tekniikan toteutustavasta ja ajautui vuosien mittaiseen umpikujaan lopulta hajoten ja UWB:n jääden ilman standardia. (Nikookar & Prasad 2009, 1–7; Prossori: UWB-tekniikka 2004; Sahinoglu, Gezi-ci & Güvenc 2008, 25–26.)

3 ULTRA WIDEBAND -TEKNIikka

3.1 UWB-teknikka yleisesti

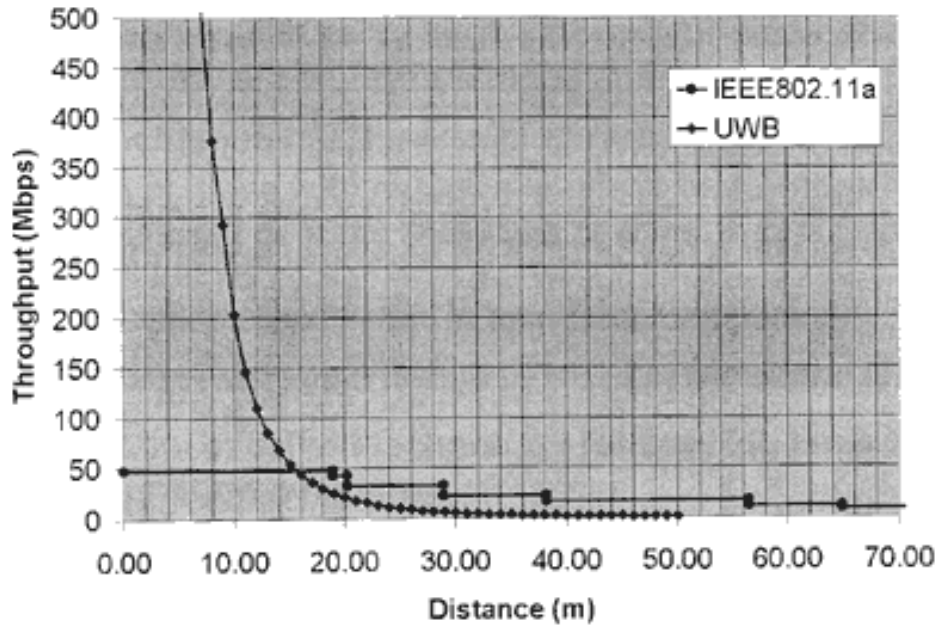
UWB eroaa selkeästi muista langattomista tiedonsiirtotekniikoista, sillä se käyttää todella laajakaistaista (esimerkiksi 1-2 GHz, mutta maksitilanteessa jopa 7,5 GHz kaistanleveys) ja pienitehoista teknologiaa. Kuviossa 1 on vertailtu UWB-spektriä tavalliseen hajaspektrilähetykseen (Spread Spectrum, SS) ja kapeakaistaiseen lähetysspektriin (Narrow Band, NB). Narrow Band käyttää hyvin pientä kaistanleveyttä, kun taas Spread Spectrum käyttää kaistanleveyttä enemmän kuin on tarpeen. Tämä johtuu siitä, että Spread Spectrum levittää kuljetettavan datan useille käyttämilleen taajuuksille. (Coleman & Westcott 2009, 197–200; Ultra Wideband for Your Fastest Computing Experience 2013.)



KUVIO 1. UWB:n ja tavanomaisten tekniikoiden spektrien vertailua (Ultra Wideband for Your Fastest Computing Experience 2013, muokattu)

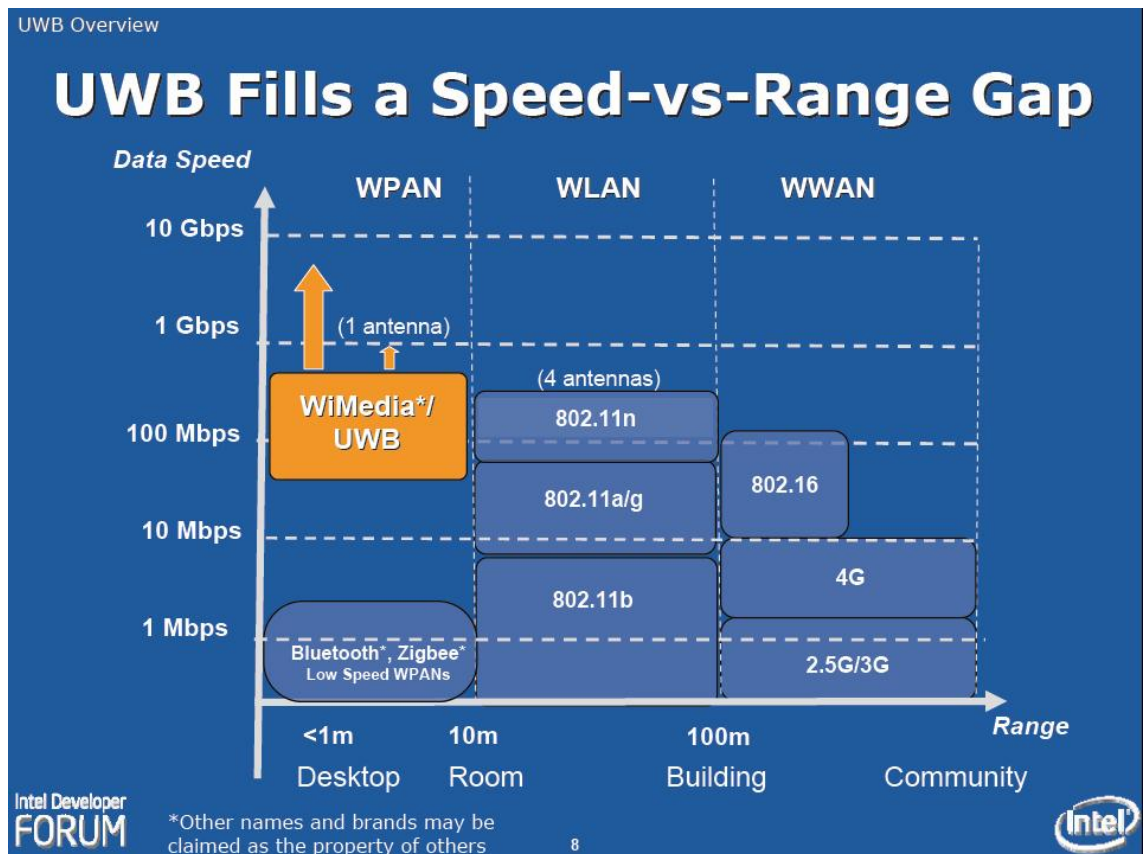
UWB:n ehdottomasti suurin etu muihin langattomiin tekniikoihin nähden on sen todella laajan taajuusalueen ansiosta huomattavan suuri siirtonopeus pienillä etäisyyksillä. Lähietäisyydellä parissa metrissä tiedonsiirtonopeus voi ylittää jopa yhden gigabitin sekunnissa ja 10–20 metrissäkin puhutaan vielä sadoista tai ainakin kymmenistä megabi-

teistä sekunnissa. Maksimikantama voi olla olosuhteista riippuen jopa satoja metrejä, mutta näillä etäisyyksillä tiedonsiirtonopeus tippuu todella radikaalisti. UWB:lle FCC:n toimesta määrätty maksimilähetysteho on $-41,25$ dBm/MHz, minkä vuoksi kantama on niin rajoittunut. Kuviossa 2 on vertailtu UWB:n ja IEEE 802.11a standardin WLAN:n siirtonopeuksia. (iXBT Labs 2002; TweakTown 2006.)



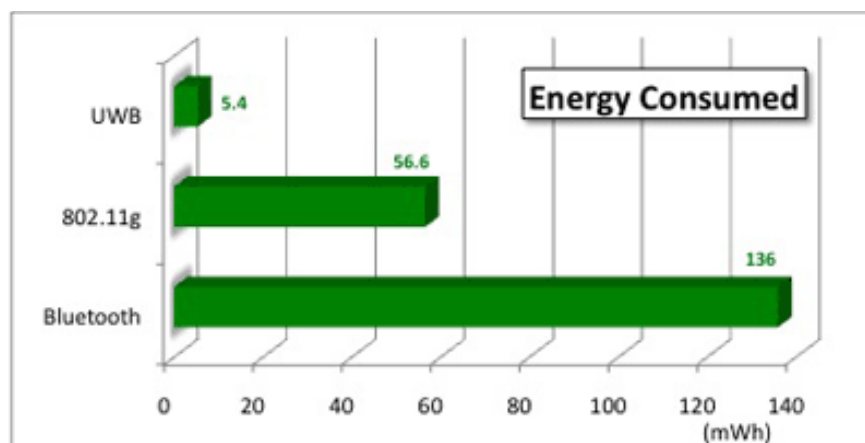
KUVIO 2. UWB:n ja IEEE 802.11a standardin WLAN:n tiedonsiirtonopeus etäisyyden funktiona (iXBT Labs 2002)

Pienillä etäisyyksillä erittäin laajakaistainen UWB on siis täysin omaa luokkaansa WLAN-yhteyksiä vastaan, mutta etäisyyden kasvaessa lähelle 20 metriä tai pidemmäksi WLAN tulee nopeuden suhteen kannattavammaksi vaihtoehdoksi matalatehotasoiseen UWB:hen verrattuna. Kuvioista 3 nähdään hyvin, miten UWB täydentää muita langattomia tiedonsiirtomenetelmiä suurella tiedonsiirtonopeudellaan lähietäisyyksillä. (TweakTown 2006.)



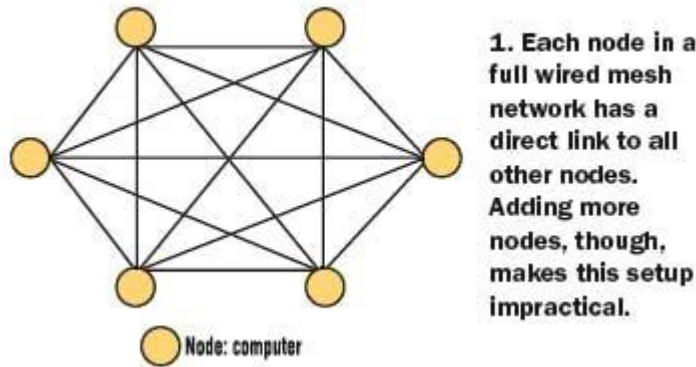
KUVIO 3. UWB täydentää muita langattomia tiedonsiirtotekniikoita (TweakTown 2006)

Toinen UWB:n merkittävä etu on sen pienestä lähetystehosta johtuva matala energiankulutus. Tämä on merkittävä etu nykymaailmassa, kun laitteet halutaan entistä pienempään kokoon ja liikuteltaviksi eli akku- tai paristokäyttöisiksi. Kuviossa 4 on vertailtu UWB:n energiankulutusta IEEE 802.11g standardin WLAN:iin ja Bluetoothiin. (Electronic Products 2008.)



KUVIO 4. Langattomien tiedonsiirtotekniikoiden energiankulutuksen vertailua (Electronic Products 2008)

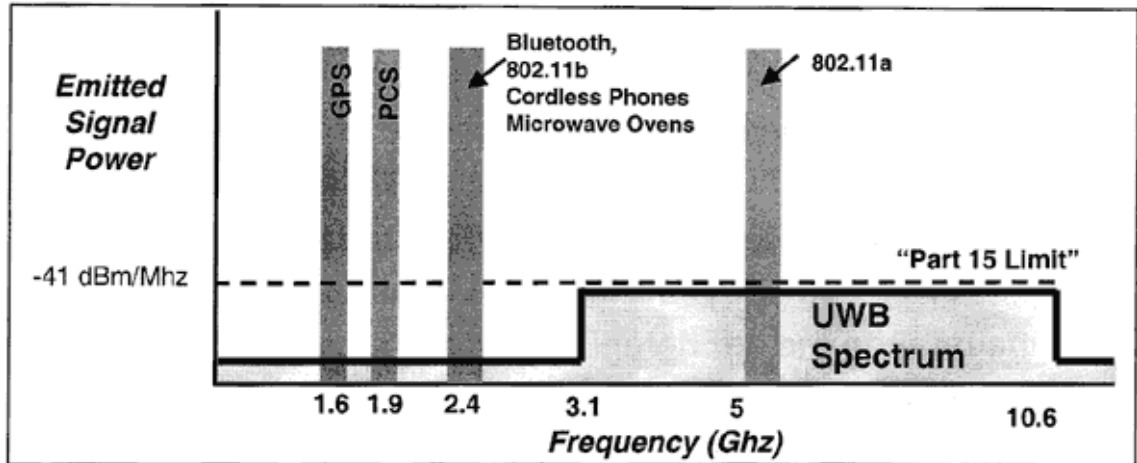
Liikuteltavuutta ja pientä kokoa tukee myös se, että UWB-verkko on niin sanottu mesh-verkko, joka tarkoittaa, että kaikki laitteet voivat ottaa yhteyden toiseen laitteeseen tai välittää datan joka on menossa laitteelta toiselle. Kuviossa 5 on esimerkki yksinkertaisesta mesh-verkosta. (Electronic Design 2005.)



KUVIO 5. Mesh-verkko (Electronic Design 2005)

UWB-tekniikassa ei käytetä perinteistä siniaaltoon perustuvaa kantoaaltoa. Sen sijaan tekniikka perustuu siihen, että luodaan, lähetetään ja vastaanotetaan hyvin lyhytkestoisia, mutta laajakaistaisia (jopa useiden gigahertsien alueelle leviäviä) pulsseja radiotaajuuksilla. Pulssit lähetetään pseudosatunnaisin eli määrätyin, mutta satunnaisuutta muistuttavin väliajoin. Tämän vuoksi pulssit eivät resonoi voimakkaasti ympäristön kanssa. (Ultra Wideband for Your Fastest Computing Experience 2013.)

Pulssit ovat noin nanosekunnin kestäviä ja hyvin pienitehoisia, jotta ne eivät levitessään aiheuttaisi häiriöitä muihin samalla taajuusalueella toimiviin laitteisiin. Lyhytkestoisuuden ja pienitehoisuuden vuoksi UWB-signaalin ei ainakaan teoriassa pitäisi siis häiritä muita taajuusalueella olevia laitteita, sillä muut laitteet eivät ehdi reagoida lähetykseen. UWB:n spektrin uskotaan myös peittyvän kohinaan, joten se ei häiritse muiden samoilla taajuuksilla toimivien sovellusten toimintaa. Kuviossa 6 on havainnollistettu miten esimerkiksi WLAN (esimerkissä IEEE 802.11a) voi toimia samalla taajuusalueella UWB:n kanssa, koska UWB:n teho on niin pieni. Kohinataso on suunnilleen sama kuin UWB-spektrin säteilytaso. Vaikka maailmasta löytyy myös epäilijöitä UWB:n häiriöttömyyden suhteen, ei suoritetuissa testeissä ole ainakaan tähän mennessä löytynyt järjestelmää, jolle UWB:sta aiheutuisi merkittävää häiriötä. Edellä mainitut seikat luovat kuitenkin myös UWB-tekniikan suurimmat haasteet, kun vastaanottavan laitteen tulee löytää nanosekuntien tarkkuudella lähettäjän lähettämät pulssit. (Sahinoglu, Gezici & Güvenc 2008, 20–21; Ultra Wideband for Your Fastest Computing Experience 2013.)



KUVIO 6. UWB-signaali ei häiritse samalla taajuusalueella toimivia tekniikoita, sillä se peittyy kohinaan (iXBT Labs 2002)

Edellä mainittujen seikkojen vuoksi yksi UWB:n vahvuuksista on tietoturva, sillä pieni-tehoinen ja leveälle kaistalle levitetty lähetys sekoittuu taustakohinaan ja on erittäin vaikea havaita, ellei tiedä oikeaa taajuutta. Lisäksi tarvitaan vielä oikea purkukoodi lähetysten purkamiseksi eikä tämäkään vielä välttämättä riitä, sillä UWB:n paikannusmahdollisuuksien vuoksi UWB-laitteet voivat havaita kuinka kaukana toinen UWB-laitte on. Tämän perusteella on mahdollista suodattaa laitteet, joille dataa halutaan lähettää tai joilta dataa halutaan vastaanottaa. (Oppermann, Hämäläinen & Iinatti 2004, 3.)

3.2 Signaalin määrittelyt ja rajoitukset

Yleisesti UWB-signaalin katsotaan olevan signaali, jonka suhteellinen kaistanleveys on suurempi kuin 25 % absoluuttisesta kaistanleveydestä tai yli 1,5 gigahertsiä. Yhdysvaltain viestintäviraston FCC:n vaatimus UWB-signaalille on kuitenkin, että suhteellinen kaistanleveys on vähintään 20 % absoluuttisesta kaistanleveydestä tai vähintään 500 MHz. (Sahinoglu, Gezici & Güvenc 2008, 20.)

Absoluuttinen kaistanleveys B lasketaan yhtälöllä (1) taajuuskaistan ylärajan $f_H - 10$ dB ja taajuuskaistan alarajan $f_L - 10$ dB erotuksena (Sahinoglu, Gezici & Güvenc 2008, 20).

$$B = f_H - f_L \quad (1)$$

Tätä kutsutaan myös -10 dB taajuuskaistaksi. Suhteellinen kaistanleveys sen sijaan lasketaan yhtälöllä (2) (Sahinoglu, Gezici & Güvenc 2008, 21).

$$B_{\text{frac}} = \frac{B}{f_c} \quad (2)$$

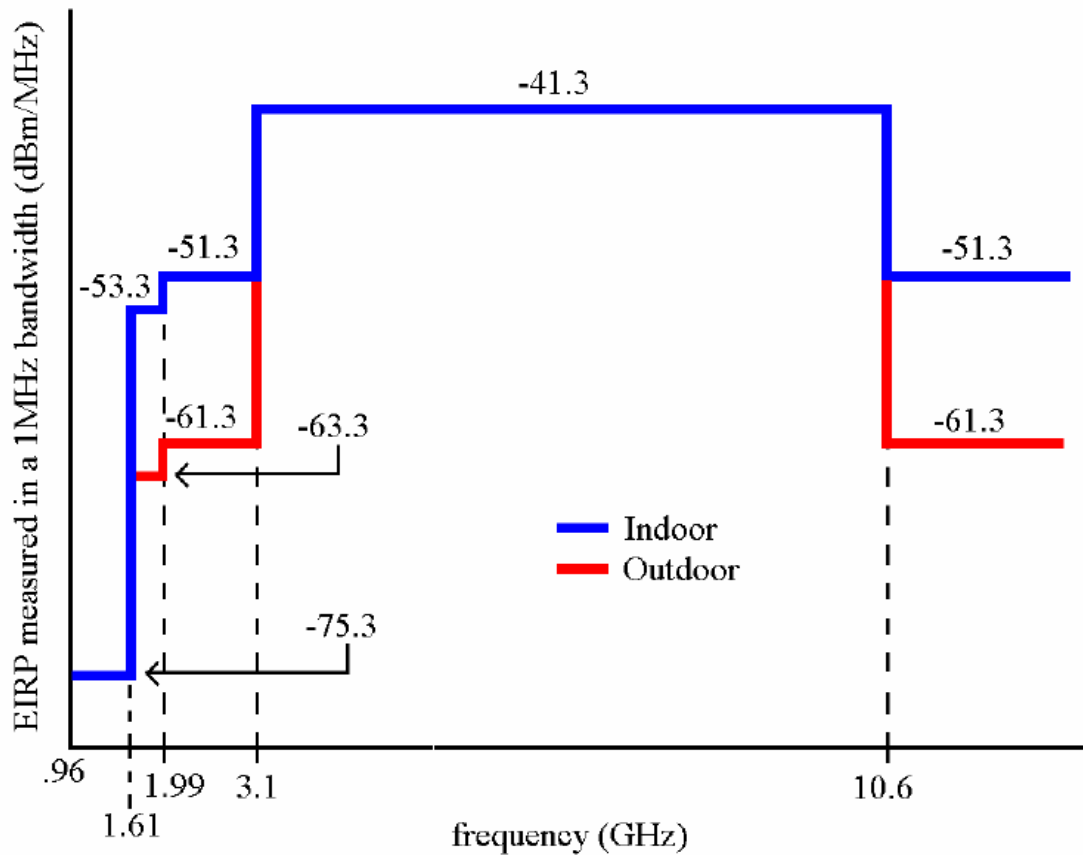
Yhtälössä (2) f_c on keskitaajuus ja se saadaan yhtälöstä (3) (Sahinoglu, Gezici & Güvenc 2008, 21).

$$f_c = \frac{f_H + f_L}{2} \quad (3)$$

Suhteellisen kaistanleveyden B_{frac} laskuyhtälö (2) saadaan täten kirjoitettua alla olevaan yhtälön (4) muotoon yhdistämällä yhtälöt (1) ja (3) (Sahinoglu, Gezici & Güvenc 2008, 21).

$$B_{\text{frac}} = \frac{2(f_H - f_L)}{f_H + f_L} \quad (4)$$

UWB-tekniikalle on määritelty myös maksimilähetystehot eri taajuuksille, niin sisätiloihin kuin ulkotiloihinkin. Sisätiloissa maksimilähetystehot ovat joillain taajuusalueilla hieman isompia kuin ulkona, koska sisätiloissa signaali ei pääse häiritsemään muita sovelluksia niin paljon kuin vapaassa tilassa ulkona. Kuviossa 7 on tarkemmin esitettyinä FCC:n maksimitehon vaatimukset eri taajuusalueilla Yhdysvalloissa. (Sahinoglu, Gezici & Güvenc 2008, 25–26.)



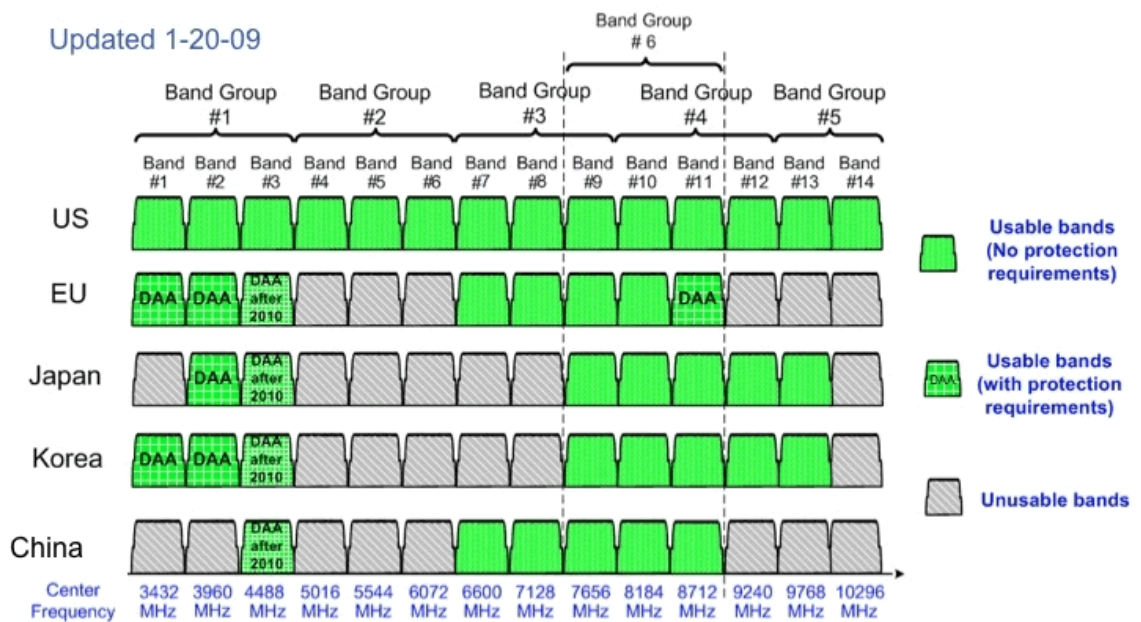
KUVIO 7. UWB:n maksimaalisen lähetystehon vaatimukset eri taajuusalueilla sekä suljetussa että avoimessa tilassa Yhdysvalloissa (m8ta.com 2007)

Maksimitehotasorajoituksiin käytetään yksikköä dBm/MHz. Tämä yksikkö tarkoittaa, että rajoitukset määritellään suhteessa isotrooppisen antennin säteilytehoon, mikä tunnetaan myös termillä EIRP (Effective Isotropic Radiated Power). Raja määritellään mittaamalla UWB-signaalin suurin voimakkuus mittaustaajuusalueeseen kuuluvilla taajuuksilla mistä tahansa suunnasta. Tämän jälkeen keskiarvo saadaan mittaamalla 1 MHz resoluutiokaistanleveydellä RMS-ilmaisimella keskimääräisen mittausajan ollessa 1 ms tai vähemmän. (Sahinoglu, Gezici & Güvenc 2008, 25–26; The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms 2000, 391.)

FCC:n Yhdysvaltoihin määrittämä maksimilähetysteho UWB:lle 3,1–10,6 GHz:n taajuusalueella on $-41,25$ dBm/MHz (sekä sisä- että ulkotiloissa) ja muilla taajuusalueilla vielä pienempi. Lähetysteho on siis huomattavasti pienempi kuin yleisemmillä tekniikoilla Bluetoothin maksimitehotason ollessa 0 dBm ja WLAN:n 20 (802.11g) dBm. Pienen lähetystehon ansiosta UWB-laitteet luonnollisesti ovat erittäin energiatehokkaita ja näin ollen myös kustannustehokkaita. Matala lähetysteho toki rajoittaa kantaman li-

säksi käytettävissä olevia modulaatiomenetelmiä, mutta tietenkin mahdollistaa myös UWB:n todella laajan kaistan, joka taas mahdollistaa erittäin nopeat siirtonopeudet. (Sahinoglu, Gezici & Güvenc 2008, 25–32.)

Muualla maailmassa ollaan ainakin toistaiseksi huomattavasti Yhdysvaltoja tarkempia UWB:lle sallittujen ja siltä kiellettyjen taajuuksien suhteen. Kuviossa 8 on tarkemmin esitettynä eri maissa tai maanosissa olevat määräykset tai esitykset UWB-taajuuksille. (Sahinoglu, Gezici & Güvenc 2008, 25–32.)



KUVIO 8. UWB:lle sallitut ja kielletyt taajuudet eri maissa (Wikipedia: List of UWB Channels 2009)

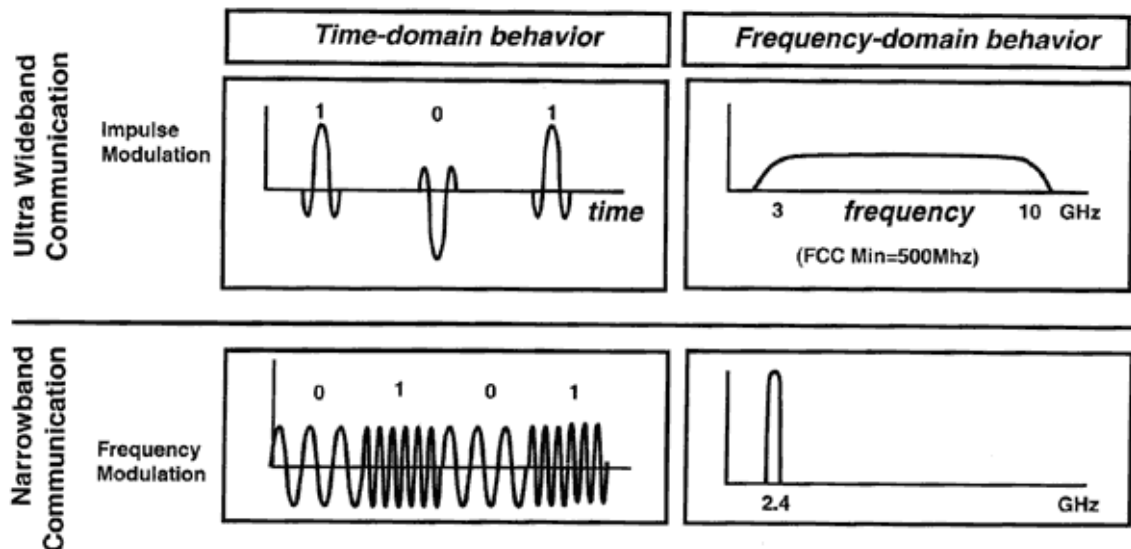
Kuviosta 8 huomataan, että Euroopan esityksessä taajuusalueesta vain n. 6–9 GHz alue on UWB:n käytettävissä yhtä vapaasti kuin Yhdysvalloissa. Esimerkiksi 5–6 GHz on kielletty kokonaan UWB:n käytöstä, koska se kuuluu mm. WLAN-käyttöön. Yhdysvaltojen ulkopuolella joillakin taajuuksilla UWB:ssa voidaan joutua käyttämään häiriönlievennystä eli toisin sanoen halutaan välttää taajuusalueen ylikuormittuminen, jotta laitteiden toisille aiheuttamat häiriöt pysyvät pieninä. Käytännössä näissä menetelmissä useimmiten priorisoidaan tiettyjä tiedonsiirtotekniikoita. Yhdysvaltojen ulkopuolella priorisointi tapahtuu useimmiten UWB:n kustannuksella, sillä jo olemassa olevien UWB:n taajuusalueita käyttävien tekniikoiden toiminta halutaan taata. Euroopassa ovat ongelmana myös eroavaisuudet eri maiden välillä taajuusalueiden jaosta tietoliikenteen käyttöön. Jossain maassa vapaana oleva taajuusalue saattaa olla toisessa maassa varattu

muuhun käyttöön ja päinvastoin. Nämä kysymykset ovat kriittisiä UWB:n standardoinnin ja leviämisen suhteen. Ilman yhteisiä sovittuja taajuusrajoituksia standardointi ja tätä kautta laitteiden yhteensopivuus ja tekniikan leviäminen on todella haastavaa, ellei jopa mahdotonta. (Sahinoglu, Gezici & Güvenc 2008, 25–32.)

Euroopassa häiriönlievennykseen joudutaan käyttämään taajuusalueryhmässä 1 (Band Group #1, kuvio 8) häiriönlievennystekniikkaa nimeltä Detect and Avoid (DAA), joka havaitsee muun samaa taajuutta käyttävän liikenteen ja tämän jälkeen joko vaihtaa taajuutta tai lopettaa oman lähetyksen. Tämä on kuitenkin teknisesti vaikea toteuttaa. Toinen mahdollinen häiriönlievennystekniikka on Low Duty Cycle (LDC), jossa lähetys on päällä vain hetkittäin, jolloin häiriön todennäköisyys ja häiriöt itsessään jäävät pieniksi. Käytännössä tässä tekniikassa on rajoitettu UWB-lähetyksessä olevan pulssijonon pituutta. Itse pulssit eivät siis eroa mitenkään ilman LDC:tä lähetettävistä pulsseista. Toinen tekijä johon LDC vaikuttaa, on pulssijonojen välinen aika. Pulssijonon pituuden pitää siis jäädä tietyn rajan alle, kun taas pulssijonojen välisen ajan pitää olla vähintään tälle säädetty aika. Tällaisilla toimilla datan siirto on tietenkin hitaampaa kuin ilman rajoituksia ja tämän vuoksi LDC-tekniikalla tiedonsiirtonopeus kärsii. (Sahinoglu, Gezici & Güvenc 2008, 25–32.)

3.3 Toimintaperiaate

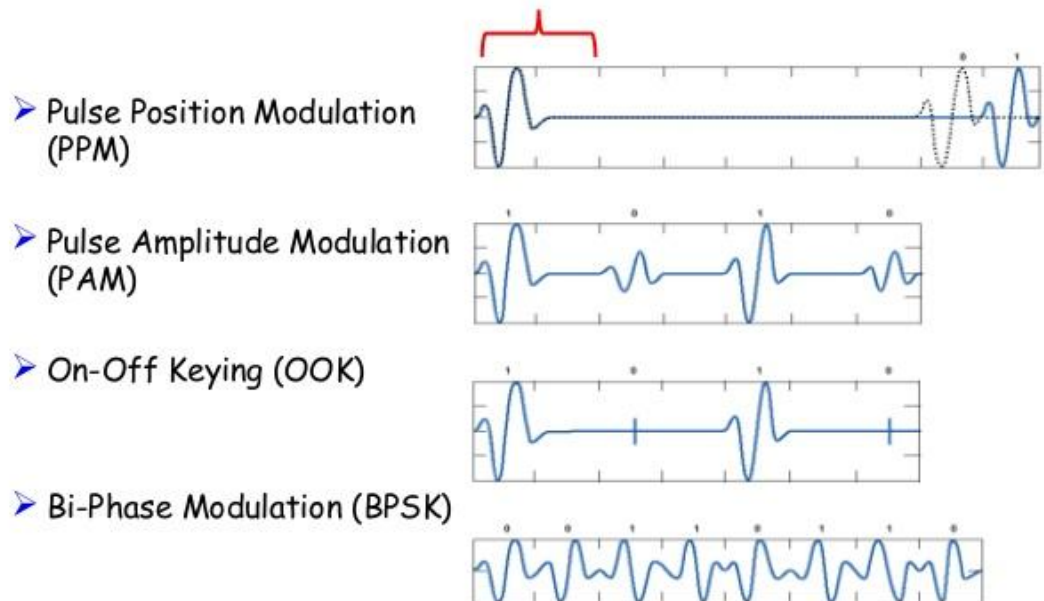
UWB perustuu impulssiradiotekniikkaan eli signaali koostuu laajakaistaisten ja ultralyhyiden pulssien jonosta. Pulssit ovat yleensä niin sanottuja monopulseja, ultrakorkeita siniaaltoja, joissa pulssin pituus vaihtelee 0,1–1,6 ns välillä ja jonossa pulssien väli toisistaan on noin 25–1000 ns. Kuviossa 9 nähdään miten kantaalloiton ja impulseihin perustuva UWB-signaali eroaa tavanomaisesta kantaalloisesta kapeakaistasignaalista sekä aikatasossa että taajuustasossa. (Sahinoglu, Gezici & Güvenc 2008, 20–22.)



KUVIO 9. Impulsseihin perustuva UWB-signaali ja kantaaltonen kapeakaistainen signaali aikatasossa ja taajuustasossa (iXBT Labs 2002)

Vaikka UWB-signaali on kantaalloitonta, voidaan sitä moduloida. Pieni lähetysteho kuitenkin rajoittaa käytettävissä olevia modulointitekniikoita. UWB:ssä mahdollisia modulointitekniikoita ovat esimerkiksi Pulse Position Modulation (PPM), Pulse Amplitude Modulation (PAM), On-Off Keying (OOK), Bi-Phase Modulation (BPSK) tai Quadrature Phase Shift Keying (QPSK). Kuviossa 10 on esitelty erilaisia modulointimenetelmiä. Myös aikahyppelymenetelmää, jonka tarkoitus on rikkoa jaksollisuutta, on mahdollista käyttää, mutta aikahyppelyssä pulssien paikka vaihtelee pseudosatunnaisesti, joten vastaanottimen täytyy tuntea käytössä oleva pseudosatunnainen hyppelysekvenssi. (Oppermann, Hämäläinen & Iinatti 2004, 39–65.)

Data Modulation



KUVIO 10. UWB-tekniikkaan soveltuvia modulointimenetelmiä (Low Power UWB Technology for WBAN 2014)

UWB käyttää myös koodijakokanavointia, CDMA (Code Division Multiple Access), jossa jokainen käyttäjä saa koodin, jolla se yksilöidään verkossa ja data lähetetään koodin avulla. Tällöin käyttäjät voivat samanaikaisesti käyttää samaa taajuutta häiritsemättä muita käyttäjiä. Koodien ansiosta signaalin voi levittää myös niin laajalle kaistalle, että signaali voi peittyä luonnossa esiintyvän kohinan alapuolelle. Koodit tarjoavat niin sanottua koodausvahvistusta eli oikean koodin löytyessä kohinan alapuolella oleva signaali vahvistuu niin, että signaali voidaan havaita. (Oppermann, Hämäläinen & Iinatti 2004, 45.)

Koska UWB:n lähetysteho on pieni, kasvaa bittivirhesuhde (BER) eksponentiaalisesti etäisyyden kasvaessa. Tämän takia signaalia pitää saada jotenkin prosessoitua niin, että bittivirhesuhde saataisiin pidettyä mahdollisimman pienenä. Tähän on kaksi ratkaisua, joista kummassakin kuitenkin tiedonsiirtonopeus kärsii. Ensimmäisessä ratkaisussa yhden bitin esittämiseen voidaan käyttää useampia impulsseja. Mitä enemmän impulsseja käytetään yhteen bittiin, sitä parempi tulos. Toisessa ratkaisussa käytetään alhaista pulssisuhdetta eli lähetettävä impulssi on suhteessa hyvin lyhyt verrattuna impulssien väli-

seen aikaan. Tällöin vastaanotin havaitsee pulssin herkemmin häiritsevän jatkuva-aikaisen signaalin seasta. (Oppermann, Hämäläinen & Iinatti 2004, 39–65.)

3.4 Toteutus

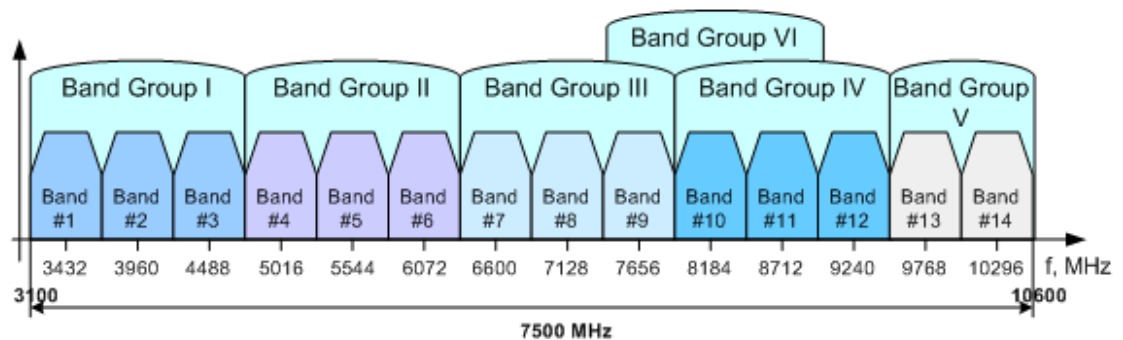
UWB-tekniikan toteutuksen voidaan ajatella muodostuvan kolmesta kerroksesta: fyysinen kerros, MAC-kerros sekä niin kutsuttu lähestymiskerros. Lähestymiskerroksen kautta voidaan liittää olemassa olevia ja tulevia sovelluksia ja tiedonsiirtotekniikoita, esimerkkeinä langaton USB eli WUSB ja Bluetooth. Fyysinen kerros sisältää laitteen koko fyysisen toteutuksen lähettimestä antenniin ja vastaanottimeen ja tässä kerroksessa määritellään mm. tiedonsiirtotekniikka, modulointitapa, kaistanleveys ja taajuus, jolla laite kommunikoi. MAC-kerroksen suhteen UWB-radion fyysinen kerros asettaa vain joitakin tiukkoja vaatimuksia ja MAC-protokollaa valittaessa vaatimukset löytyvätkin pääosin tavoiteltujen sovelluksien näkökulmasta. UWB-radion tulee selvitä useiden samanaikaisten, mutta erityyppisten lähetysten ylläpidosta, joissa tarkasteltava laite osallistuu vain osaan toiminta-alueella olevista yhteyksistä. Tämä luo huomattavat haasteet MAC-protokollalle. (Oppermann, Hämäläinen & Iinatti 2004, 157–173.)

Standardoinnin ongelmat liittyvät olennaisena osana tekniikan toteutukseen. Fyysisestä kerroksesta ei ole olemassa standardia kuten ei ole myöskään MAC-kerroksesta. Erityisesti fyysisen kerroksen standardin puute on suuri ongelma tekniikan leviämislle ja yhteensopivuudelle. Fyysisen kerroksen toteuttamiseen on olemassa kaksi vaihtoehtoa ja nämä ovat juuri ne vaihtoehdot joista UWB:n standardointia varten 2003 perustettu TG3a-työryhmä ei päässyt yksimielisyyteen ja hajosi vuonna 2006. (Proessori: UWB-tekniikka 2004.)

Impulssiradiotekniikka eli yksiaaltotekniikka on vaihtoehdoista yksinkertaisempi ja perustuu alkuperäiseen ideaan UWB:sta. Siinä tietoa lähetetään suoraan kantataajuudella noin nanosekunnin pituisilla pulsseilla. Tässä vaihtoehdossa lähetin on rakenteeltaan todella yksinkertainen ja tehonkulutukseltaan todella alhainen, joten tämä toteutusvaihtoehto on erittäin edullinen. Impulssiradiotekniikassa on kuitenkin heikkouksia, sillä lähettimen ollessa yksinkertainen vastaanottimen rakentaminen onkin monimutkaisempaa, sillä sen pitää pystyä hallitsemaan pitkiä etenemiskanavia sekä symbolien välisiä häiriöitä. Tekniikalla toimivassa verkossa jonkin laitteen on myös toimittava koor-

dinaattorina, joka jakaa kanavankäyttöluvat ja pitää kirjaa ja tietoja verkossa olevista laitteista. Koordinaattori joutuu myös olemaan jatkuvasti aktiivinen ja kuluttaa täten muita laitteita enemmän tehoa. Verkossa ei myöskään voi olla koordinaattoreita enemmän kuin yksi, joten käytännössä impulssiradiotekniikkaa on vaikea toteuttaa, mikäli kaikkien laitteiden pitäisi pystyä liikkumaan vapaasti. Sen sijaan jos verkossa on selkeästi jokin laite joka toimii koordinaattorina ja pysyy pääasiassa paikallaan, on impulssiradiotekniikka hyvä vaihtoehto. (Oppermann, Hämäläinen & Iinatti 2004, 157–173; Prosessori: UWB-tekniikka 2004.)

Toinen toteutusvaihtoehto on MB-OFDM (Multi-Band Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) eli monikantoaalto-modulaatio. Tämä tekniikka on uudempi ja monimutkaisempi ja sen etuna on, että kaikki laitteet voivat liikkua vapaasti verkkoon ja siitä pois eikä erillistä koordinaattoria tarvita vaan kaikki laitteet osallistuvat omalta osaltaan verkon koordinointiin. MB-OFDM -tekniikassa koko käytettävä taajuusalue jaetaan 528 megahertsin levyisiin kaistoihin, jotka muodostavat yhdessä kanavia. Tätä on havainnollistettu kuviossa 11. Tekniikka perustuu nopeaan taajuushyppelyyn kaistojen välillä. Laitteiden liikkumavaran lisäksi MB-OFDM -tekniikan etuja ovat tehokkuus ja häiriön-sietokyky. (Oppermann, Hämäläinen & Iinatti 2004, 157–173; Prosessori: UWB-tekniikka 2004; Rohde & Schwarz 2015.)

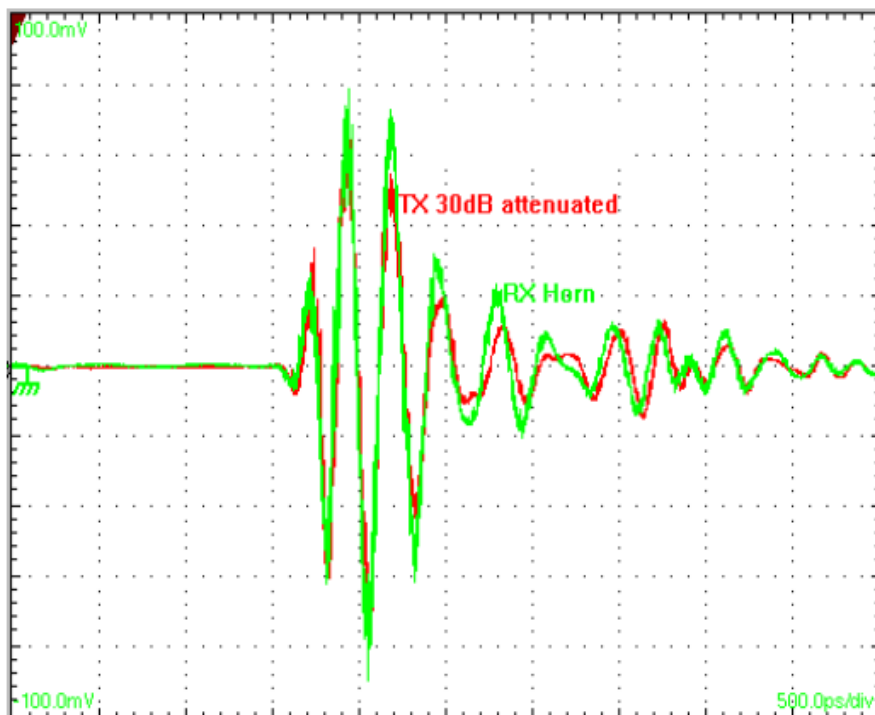


KUVIO 11. MB-OFDM -tekniikan taajuuksien jako kanaviin (Rohde & Schwarz 2015)

Käytettiin kumpaa toteutustapaa hyvänsä, niin UWB-laitteet ovat hyvin yksinkertaisia ja halpoja valmistaa ja se on yksi asia joka kannustaa tuomaan ja kehittämään UWB-tekniikkaa markkinoille. Laitteet ovat lähes kokonaan digitaalisia ja teho vaatimuksiltaan vähäisiä, joten ne voidaan valmistaa yksinkertaisina CMOS-toteutuksina. (Ultra Wide-band for Your Fastest Computing Experience 2013.)

3.5 Antenni

Toisin kuin perinteisissä kapeakaistaisemmissa tekniikoissa, UWB-tiedonsiirrossa antenniin on syytä kiinnittää erityistä huomiota, sillä erittäin laajan kaistan vuoksi antennilla on UWB:ssä suurempi vaikutus kuin kapeakaistaisemmissa tekniikoissa. Antenni toimii suodattimena tuotetulle UWB-signaalille. UWB:n erityispiirteet eli laaja taajuuskaista ja matala teho sekä pulssien erittäin lyhyt kesto aiheuttavat antennille vaatimuksia. UWB-antennin on oltava erittäin tarkka. Tavalliset radioliikenneantennit eivät käy, sillä ne on suunniteltu huomattavasti kapeammalle taajuuskaistalle kuin erittäin laajakaistainen UWB. Kapealle taajuuskaistalle suunnitellut antennit perustuvat usein resonanssiin ja vaikka ne toimivat hyvin käyttötarkoituksissaan, vääristävät ne UWB-signaalia sen impulsseihin perustuvan luonteen vuoksi. Normaleissa, perinteisten tekniikoiden antenneissa resistiivisyys on pieni, mikä aiheuttaa antennissa impulssivasteen resonointia. Tämä ei sovellu UWB-tekniikan erittäin lyhyiden impulssien vastaanottoon, sillä resonointi muokkaa impulssia vääristäen sitä aika- ja taajuustasossa. Kuviossa 12 on esitetty miten signaali vääristyy resonoinnin vuoksi. (Oppermann, Hämäläinen & Inatti 2004, 129–136; Powell 2004; Sahinoglu, Gezici & Güvenc 2008, 218–221.)

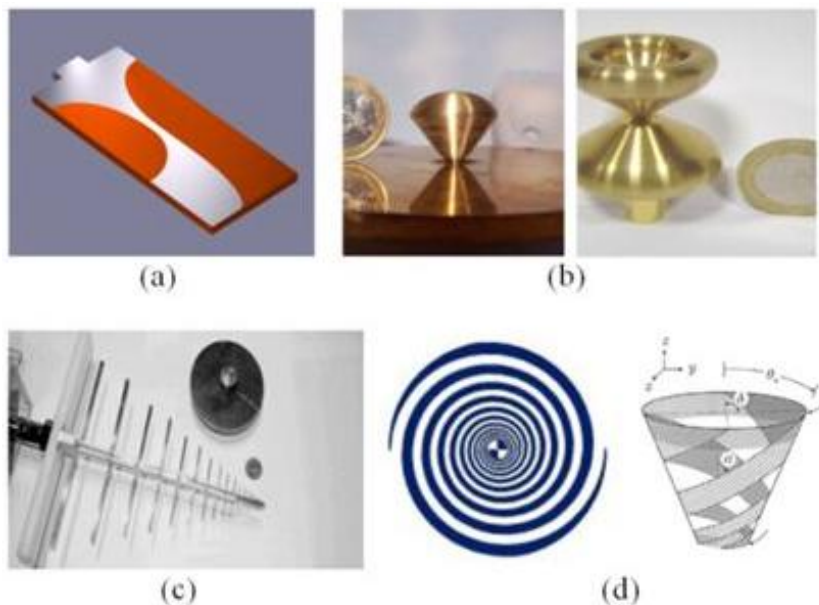


KUVIO 12. Resonoinnin aiheuttamaa vääristymää UWB-signaalissa (Powell 2004, 48)

Impulssivasteen parantamiseksi ja resonoinnin lieventämiseksi UWB-antenneissa käytetään usein resistiivistä kuormaa. Resisttiivinen tarkoittaa sitä, että virta ja jännite ovat

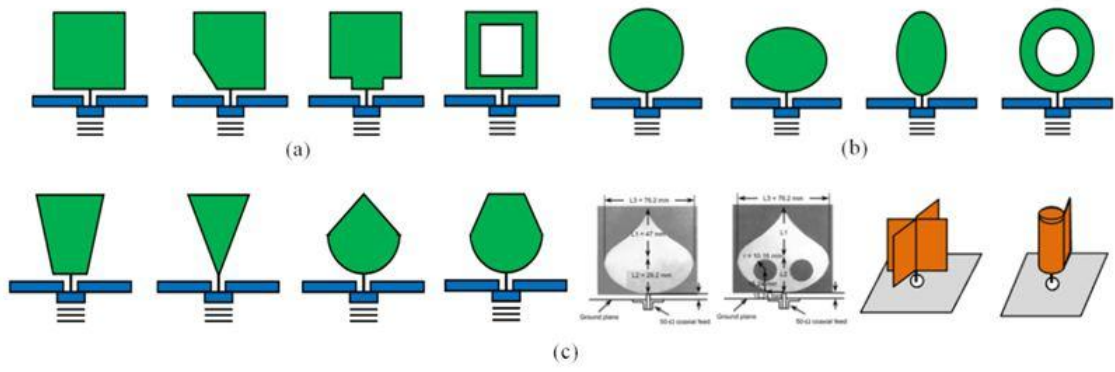
samassa vaiheessa. Tällaisen kuorman käyttö parantaa impulssivastetta vähentämällä antennin resonointia, mutta samalla antennin säteilytehokkuus kärsii. Varsinkin pienissä kannettavissa laitteissa, joita ei ole tarkoitettu tukiasemiksi, on järkevää käyttää resistiivistä kuormaa. Tukiasemien antennien tarvitsee kuitenkin olla tehokkaita säteilijöitä, kun pyritään mahdollisimman pitkään kantamaan, joten tällöin resistiivistä kuormaa ei voida käyttää. (Oppermann, Hämäläinen & Inatti 2004, 129–136; Powell 2004; Sahinoglu, Gezici & Güvenc 2008, 218–221.)

UWB-antennin fyysisillä ominaisuuksilla on myös merkitystä. On suotavaa, että antenni on pieni, koska UWB-laitteista on suunniteltu pieniä eikä tekniikka muilta osin vaadi fyysisesti suuria komponentteja. Myös litteys on ehdoton vahvuus antennia suunniteltaessa. Muodon suhteen UWB-signaalille sopivia antennityyppejä ovat esimerkiksi erilaiset torviantennit ja kierreantennit sekä niin kutsutut ”bow-tie” -antennit, jotka sopivat erityisen hyvin valmistettavaksi litteinä. Kuviossa 13 on esimerkkejä erilaisista vaihtoehdoista UWB-antennin muodolle. (Oppermann, Hämäläinen & Inatti 2004, 129–136; Powell 2004; Sahinoglu, Gezici & Güvenc 2008, 218–221.)



KUVIO 13. Esimerkkejä UWB-antennin suunnitteluun (Intech: UWB Antennas for Wireless Applications 2013, muokattu)

UWB-antennin voi toteuttaa litteästi mm. neliömäisillä, pyöreillä tai monilla muilla muodoilla. Kuviossa 14 on joitakin esimerkkejä erilaisista litteistä UWB-antenneista.



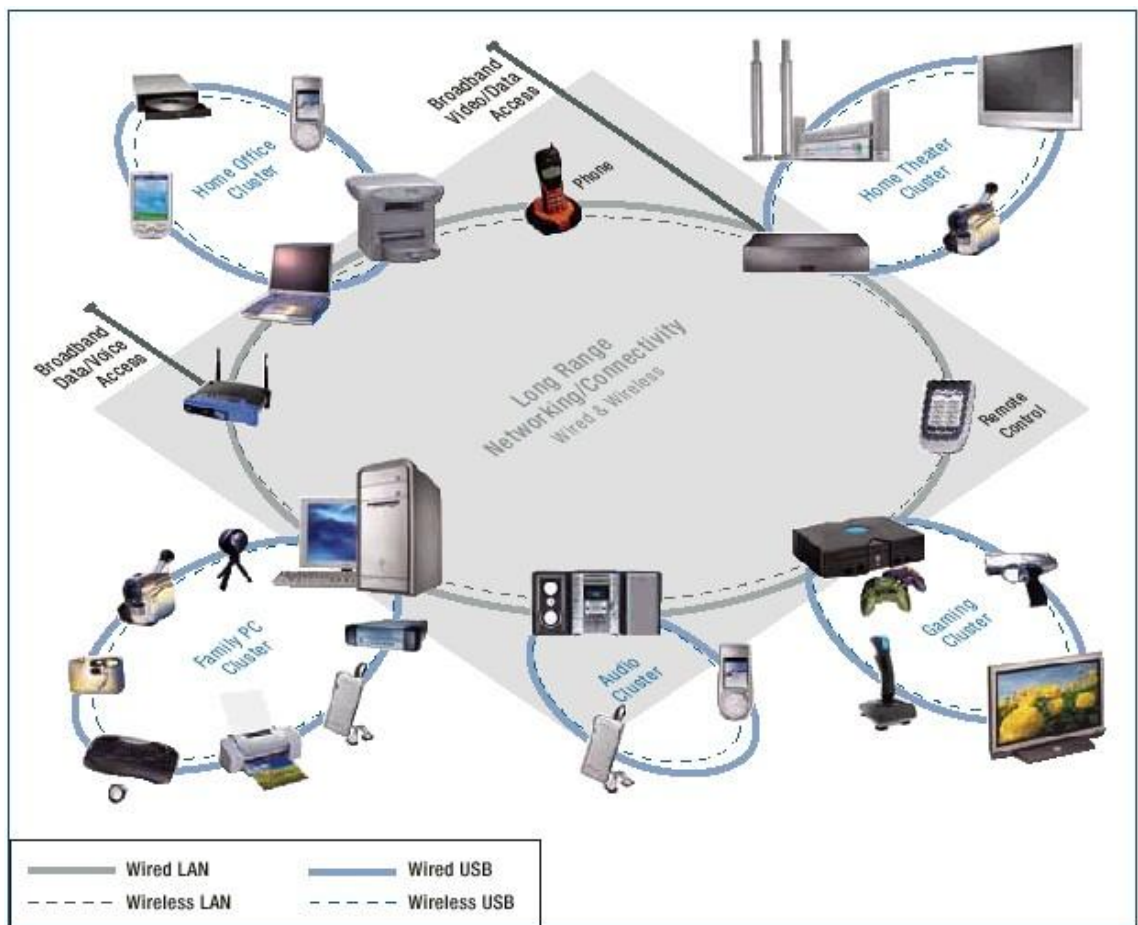
KUVIO 14. Litteitä UWB-antenneja (Intech: UWB Antennas for Wireless Applications 2013)

4 SOVELLUSKOHTEET

UWB-tekniikka on alun perin kehitetty sotilaalliseen kommunikointiin, ja sen käyttöön onkin laajaa kiinnostusta sotilaallisella sektorilla sen hyvän tietoturvan ansiosta. UWB:n suurimmat kaupalliset mahdollisuudet nähdään kuitenkin kodin viihde-elektroniikan ja hyötyelektroniikan liittämässä nopealla ja langattomalla yhteydellä toisiinsa. Nykyisin viihde-elektroniikan tiedonsiirrolle asettaa vaatimuksensa mm. koko ajan kasvava videokuvan resoluutio ja jatkuvasti lisääntyvä liikkuva viihde- ja hyötyelektroniikka. Langattomuuden kysyntä ja nopeusvaatimukset kasvavat jatkuvasti ja tekniikoiden on pystyttävä vastaamaan kasvavaan tiedonsiirtonopeuden tarpeeseen. UWB on tässä vaiheilla sen lyhyen kantaman nopeuden ja pienen kokonsa vuoksi. UWB:n nopeus mahdollistaa mm. korkearesoluutioisen videokuvan reaaliaikaisen toistamisen langattomasti. Se on myös yhteensopiva yleisimpien WLAN-standardien kanssa, joten nämä tekniikat voivat täydentää toisiaan. (Ultra Wideband for Your Fastest Computing Experience 2013.)

UWB-tekniikan mahdollisuudet eivät kuitenkaan rajoitu tähän, vaan sitä voidaan käyttää myös perinteiseen tiedonsiirtoon. Tekniikkaa voidaan hyödyntää myös erilaisissa lyhyen kantaman tutkasovelluksissa kuten tarkassa sisätilojen paikannuksessa ja lyhyen kantaman erittäin tarkkoissa etäisyysmittauksissa. Suomessa UWB-paikannusta on tutkinut ja kehittänyt esimerkiksi Teknologian tutkimuskeskus VTT. Tutkasovelluksista voi olla sotilaallisen käytön lisäksi apua monilla muillakin aloilla. Esimerkiksi lääketieteessä voidaan UWB:ta käyttää onnettomuuksissa potilaiden tai sairaaloissa hoitovälineiden paikantamiseen ja UWB:lla voi olla mahdollista luoda jopa mallinnus potilaan sisäelimestä tai syövän levinneisyydestä. Myös johtoviidakosta eroon pääseminen olisi sairaaloissa suuri etu. Kulkuneuvoissa UWB:lla voidaan luoda törmäystutkia tai ajamista helpottavia tai automatisoivia sovelluksia. Sillä voidaan paikantaa esineitä mm. maan alta tai seinien sisältä metallintunnistimen tavoin joten sitä voidaan käyttää apuna esimerkiksi rakennustekniikassa. Mahdollisia käyttökohteita ovat myös varashälyttimet tai langaton radiotaajuinen etätunnistus. Tällaisia langattomia muistitajeja (WMT) on tutkittu ja kehitetty mm. Aalto-yliopistossa. (Jantunen Joni 2015; Proessori: UWB-tekniikka 2004; Ultra Wideband for Your Fastest Computing Experience 2013.)

UWB:n yksi tärkeimmistä tällä hetkellä käytössä olevista sovelluksista on WUSB eli langaton USB (Universal Serial Bus). WUSB perustuu UWB:hen ja sen maksimitiedonsiirtonopeus on 480 Mbps. 10 metrin etäisyydellä siirtonopeus tippuu 110 Mbps:iin eli tällä etäisyydellä nopeudessa päästään lähes UWB:n maksimeihin. Wireless USB Promoter Group on asettanut tavoitteeksi tulevaisuudessa yli 1 Gbps siirtonopeuden langattomassa USB:ssa. Kuviossa 15 on havainnollistettu WUSB:n mahdollisuuksia viihdeelektronikan yhdistämisessä toisiinsa langattomasti WPAN-verkoissa (Wireless Personal Area Network) eli langattomissa likiverkoissa kytkettynä pidemmän kantaman langattomaan tai langalliseen verkkoon. (Wireless USB from the USB-IF.)



KUVIO 15. WUSB:n mahdollisuuksia elektronikan langattomaan yhdistämiseen (What is Wireless USB? 2005)

5 POHDINTA

UWB on ehdottomasti mielenkiintoisimpia ratkaisuja nopeaan ja mobiiliin WPAN-verkon tiedonsiirtoon. Sen kehitysmahdollisuudet ovat laajat. Tekniikka on tällä hetkellä jonkinlaisessa murrosvaiheessa – se ei ole lyönyt itseään vielä täysillä läpi, mutta se on tekemässä tuloaan. Onnistuessaan se toisi huomattavaa parannusta varsinkin kodin viihde-elektroniikan langattomaan tiedonsiirtoon, mutta myös monille muille tiedonsiirtotekniikan saroille.

UWB-tekniikka luultavasti tulee joskus käyttöön laajemmin ainakin jossain muodossa, sillä sen perinteisistä tekniikoista eroavan luonteen vuoksi sen kehittäminen herättää kiinnostusta. Radiotaajuusalueita on nykyään varattu niin paljon erilaisiin langattomiin tiedonsiirtotarkoituksiin, että UWB:ta vastaavan levyiseen kaistaan ei tulla tavanomaisilla tekniikoilla yltämään. UWB on pienitehoista ja koska se hukkuu kohinaan, voidaan siinä hyödyntää samoja taajuusalueita kuin muissa tekniikoissa. Tämän vuoksi UWB säästää kallisarvoista radiotaajuusspektriä ja on sen vuoksi kannattava tekniikka tutkimukselle ja kehitykselle. Myös pienestä tehonkulutuksesta ja yksinkertaisuudesta saatava pieni koko on nykyisessä mobiilissa maailmassa suuri valtti.

UWB:n suurimmat ongelmat ovat yhteisten pelisääntöjen eli standardien puuttumisessa. Yhdysvalloissa ollaan oltu UWB-tekniikan suhteen joustavia, mutta muu maailma pitää tiukemmin kiinni omista määräyksistään radiotaajuuksien jaon suhteen. Myös tekniikan toteutustavasta ollaan oltu kahdessa eri mieltä olevassa leirissä ja tästäkin pitäisi päästä yhteisymmärrykseen. Niin kauan kun standardeista ei päästä sopuun ja saada maailmanlaajuisia yleispäteviä ohjeistuksia tekniikan kehittämiseen ja laitteiden valmistamiseen, on tekniikan mahdotonta yleistyä viihde-elektroniikkakäytössä. Täytyy vain toivoa, ettei standardien syntyminen kestä niin kauan, että se lopulta johtaa koko tekniikan kuolemiseen ja kuihtumiseen, sillä UWB:ssa on todella paljon potentiaalia nopeutensa, tietoturvasa, energiankulutuksensa ja lukemattomien mahdollisuuksiensa vuoksi.

Opinnäytetyötä tehdessäni sain kokonaisvaltaisen käsityksen UWB-tekniikan ominaisuuksista, sen mahdollisuuksista sekä tekniikan vahvuuksista ja haasteista. Samalla opin huomaamattani paljon radioaaltoisista tekniikoista yleisestikin. Lopuksi voin todeta, että opinnäytetyön tekeminen oli monessakin suhteessa erittäin opettavainen prosessi.

LÄHTEET

Coleman D. & Westcott D. 2009. CWNA: Certified Wireless Network Administrator Official Study Guide. Sybex.

Electronic Design: Wireless Mesh Expands The Boundaries Of Networking. 2005. Luettu 8.12.2015.
<http://electronicdesign.com/communications/wireless-mesh-expands-boundaries-networking>

Electronic Products: Power consumption considerations for WPANs. 2008. Luettu 27.11.2015.
http://www.electronicproducts.com/Power_Products/Batteries_and_Fuel_Cells/Power_consumption_considerations_for_WPANs.aspx

Granlund, K. 2001. Langaton tiedonsiirto. Jyväskylä: Docendo Finland Oy.

Jantunen, J. 2015. An Impulse UWB Radio System for Remotely-Powered Wireless MemoryTag Applications. Luettu 8.12.2015.
<https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/16525?locale-attribute=fi>

Intech: UWB Antennas for Wireless Applications. 2013. Luettu 7.12.2015.
<http://www.intechopen.com/books/advancement-in-microstrip-antennas-with-recent-applications/uwb-antennas-for-wireless-applications>

iXBT Labs: Following the IDF: Ultra Wide Band Wireless Data Transfer Technology. 2002. Luettu 27.11.2015.
<http://ixbtlabs.com/articles2/uwb/>

Low Power UWB Technology for WBAN. 2014. Luettu 8.12.2015.
<http://www.slideshare.net/ajal4u/ultra-wide-band-technology-38194732>

m8ta.com. 2007. Luettu 27.11.2015.
<http://m8ta.com/index.pl?ptags=ultra>

Nikookar, H. & Prasad, R. 2009. Introduction to Ultra Wideband for Wireless Communications. Alankomaat: Springer.

Oppermann, I., Hämäläinen, M. & Iinatti, J. 2004. UWB Theory and Applications. Englanti: John Wiley Sons, Ltd.

Powell, J. 2004. Antenna Design for Ultra Wideband Radio. Luettu 7.12.2015.
http://www-mtl.mit.edu/researchgroups/icsystems/pubs/theses/johnna_sm_2004.pdf

Proessori: UWB-tekniikka. 2004. Proessori-lehti, marraskuu 2004.

Rohde & Schwarz. 2015. Luettu 3.12.2015.
http://www.rohde-schwarz.fr/fr/Produits/Test_Mesure/Signal_Generators/AFQK264.html

Sahinoglu, Z., Gezici, S. & Güvenc, I. 2008. Ultra-wideband Positioning Systems. Cambridge: Cambridge university Press.

The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms (IEEE 100), Seventh Edition. 2000. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers.

TweakTown: Intel demonstrates fast new Ultrawideband WPAN at IDF Taiwan. 2006. Luettu 27.11.2015.

http://www.tweaktown.com/articles/968/intel_demonstrates_fast_new_ultrawideband_wpan_at_idf_taiwan/index.html

Ultra Wideband for Your Fastest Computing Experience. 2013. Luettu 23.11.2015. <https://alok30m.wordpress.com/2013/12/29/>

What is Wireless USB? 2005. Luettu 8.12.2015.

<http://web.mst.edu/~mobildat/WUSB/index.html>

Wikipedia: List of UWB Channels. 2009. Luettu 3.12.2015.

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_UWB_channels

Wireless USB from the USB-IF. Luettu 8.12.2015.

<http://www.usb.org/developers/wusb/>