

Biomedisinske sensornettverk basert på Ultra Wide Band impulsradio og IEEE 802.15.4/Zigbee

Øyvind Kleppe Asphjell

Master i elektronikk

Oppgaven levert: Juni 2007

Hovedveileder: Ilangko Balasingham, IET

Biveileder(e): Tor A. Ramstad, IET

Oppgavetekst

Standarden IEEE 802.15.4/Zigbee er en potensiell kandidat for bruk i biomedisinske nettverk. Ultra Wide Band impulsradio er en kommunikasjonsteknologi med mange unike egenskaper som muliggjør svært høye overføringsrater ved lave effekter. Oppgaven har bestått i å undersøke muligheter for bruk av Ultra Wide Band impulsradio og Zigbee i biomedisinske sensornettverk. Det skal studeres på krysoptimering mellom lagene og hvordan UWB-IR kan implementeres i Zigbee-stakken. Det skal gjøres et kort studie av interferensproblemer i UWB nettverk og skal presentere mulige løsninger for å håndtere dette. Realistiske medisinske scenarier skal beskrives og simuleringresultater skal presenteres.

Oppgaven gitt: 22. januar 2007

Hovedveileder: Ilangko Balasingham, IET

Forord

Denne masteroppgaven er blitt utført i det 10. semesteret ved sivilingeniørstudiet i elektronikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Veileder og faglærer for masteroppgaven har vært Ilangko Balasingham ved Rikshospitalet og NTNU. Oppgaven er skrevet av Øyvind Kleppe Asphjell ved institutt for elektronikk og telekommunikasjon ved NTNU med spesialisering innen multimedia signalbehandling.

Trondheim, 20. juni 2007.

Øyvind Kleppe Asphjell

Sammendrag

Ved behandling og restitusjon av pasienter må pasientenes kroppsfunksjoner overvåkes. Typiske funksjoner som må overvåkes er blodtrykk og elektrokardiogram. Dette er til nå gjort ved kabelbaserte løsninger og en overgang til en trådløs løsning vil kunne føre til større bevegelsesfrihet hos pasientene samt at man har mulighet til å overvåke pasientene utenfor helseinstitusjonen. Et større velvære og et kortere opphold på helseinstitusjonen vil kunne bidra til en kortere restitusjonstid for pasientene.

Oppgaven har bestått i å undersøke muligheter for bruk av Ultra Wide Band impulsradio og Zigbee i biomedisinske sensornettverk. Det er foretatt et studie av optimal konstruksjon av et MAC lag for UWB-IR der det er fokusert på krysslagsoptimering og hvordan UWB-IR kan implementeres i Zigbee stakken. Det er også gjort et studie av interferensproblemer i UWB-IR-nettverk. To ulike MAC protokoller for UWB-IR, DCC-MAC og $(UWB)^2$, er blitt simulert i medisinske scenarioer og det er foretatt en beregning av energiforbruket ved bruk av UWB-IR og Zigbee.

Det vil være mulig å implementere UWB-IR i eksisterende standard IEEE 802.15.4/Zigbee. Dette vil derimot ikke være optimalt uten at man gjør endringer slik at de unike egenskapene til UWB-IR signalet utnyttes. Det vil også være viktig å implementere nye teknikker og funksjonaliteter som for eksempel posisjonering for å øke ytelsen til systemet ved at denne informasjonen kan utnyttes til blant annet effektkontroll. Stakken til et fysisk lag basert

på UWB-IR bør krysslagsoptimeres slik at informasjonen kan utveksles mellom lagene.

Resultatene fra simuleringene viser at DCC-MAC kommer noe bedre ut enn $(UWB)^2$ i scenario 1 ved at den håndterer interferensen og NLOS bedre. $(UWB)^2$ gir derimot et lavere pakketap ved LOS i scenario 2. Sammenligningen mot Zigbee viser at begge protokollene gir et lavere pakketap ved økende antall noder.

Beregningen av energiforbruket for Zigbee og UWB-IR viser at bruk av UWB-IR vil øke levetiden til nodene i nettverket betraktelig. Zigbee-noder har en maksimal levetid på 140,1 dager ved bruk av største pakkestørrelse og minste sendereffekt. Ved bruk av UWB-IR vil det være mulig å øke levetiden til nodene til 554,5 dager, som er den maksimale levetiden til hver av protokollene. Beregningene viser også at valg av antall pulser som transmitteres per bit og hvilken koderate som benyttes i kanalkoderen for UWB-IR ikke har stor innvirkning på den totale levetiden til nodene.

Innhold

1	Innledning	1
2	Zigbee/802.15.4	3
2.1	LR-WPAN	4
2.2	IEEE 802.15.4 WPAN	5
2.3	Det fysiske laget	5
2.4	MAC laget	6
2.4.1	Dataoverføringsmodell	8
2.5	Nettverkslaget	10
2.6	Applikasjonslaget	11
3	Ultra Wideband	13
3.1	UWB impulsradio	14
3.2	Multibånd UWB	16
3.3	IEEE 802.15.4a	17
4	MAC for UWB-IR	19
4.1	Multipel aksess	20
4.2	MUI	22
4.3	Reduksjon av overhead	22
4.4	Rate og effektkontroll	23
4.5	Krysslagsoptimering	25
4.5.1	Location-Aware MAC	25
4.5.2	Joint Routing/MAC i multihopp UWB transmisjoner	27

4.5.3	PHY-Aware MAC	27
4.5.4	DCC-MAC	30
4.6	UWB-IR i Zigbee stakken	33
4.6.1	Multippel aksess	33
4.6.2	Mulige løsninger	34
4.6.3	Nettverkstopologier	37
4.6.4	Nye funksjonaliteter	37
4.6.5	$(UWB)^2$	38
5	Nærbåndsinterferens	41
5.1	Effekt av NBI	41
5.2	Håndtering av NBI	42
5.2.1	Pulsforming	43
5.2.2	Rake-mottaker	44
5.2.3	MRTW og AMRTW	44
5.2.4	Bruk av filter	45
5.2.5	Interferensbekjempelse i MAC	45
6	Simulering	47
6.1	UWB^2	50
6.1.1	Simulering av UWB^2	52
6.2	DCC-MAC	55
6.2.1	Simulering av DCC-MAC	56
6.2.2	Zigbee	57
6.3	Energiforbruk	59
6.3.1	Zigbee	59
6.3.2	UWB-IR	62
7	Diskusjon og konklusjon	67
	Bibliografi	71
A	CSMA/CA algoritmen i IEEE 802.15.4	77
A.1	Unslotted CSMA/CA	77
A.2	Slotted CSMA/CA	77
B	Kanalmodell	81
B.1	UWB Path Loss Characterization In Residential Environments	81
C	Bruk av programkode	83
C.1	$(UWB)^2$ i OMNeT++	83
C.1.1	Installasjonsinstruksjon	83

C.1.2	Endring av kode	83
C.1.3	Bruk av kode	85

Figurer

2.1	Zigbee Stakken	4
2.2	Zigbee spesifikasjoner	6
2.3	Generell MPDU ramme	7
2.4	Rammestruktur til en superramme	8
2.5	Rammeformat NWK ramme	11
2.6	Nettverkstopologier i Zigbee	12
3.1	Spektermaske UWB	14
3.2	Multibånd UWB kanaler	17
4.1	Kanaltilegningstid for CSMA/CA protokollen	23
4.2	Kanaltilegningstid for TDMA protokollen	23
4.3	Krysslagsdesign for UWB	26
4.4	Adaptiv kanalkoding og privat MAC	32
4.5	Finkornet <i>Time Division Half Duplex</i> med UWB-IR	35
4.6	Korrelasjonsdetektor og terkselverdidetektor	35
4.7	Piconett struktur	37
4.8	LE PDU	39
4.9	LC PDU	39
5.1	Dublettpuls med adskillelse $1ns$	43
6.1	Plantegning for scenario 1	48
6.2	3D-illustrasjon av scenario 1	48
6.3	Plantegning for scenario 2	48

6.4	3D-illustrasjon av scenario 2	48
6.5	Brukergrensesnitt i OMNeT++ scerario1	51
6.6	Brukergrensesnitt i OMNeT++ scenario2	51
6.7	Pakkefeilrate versus antall noder, $N_s = 2$	52
6.8	Pakkefeilrate versus antall noder, $N_s = 4$	52
6.9	Pakkefeilrate versus antall noder, $N_s = 6$	53
6.10	Pakkefeilrate versus antall noder, $N_s = 8$	53
6.11	Pakkefeilrate versus pakkestørrelse, $N_s = 2$	54
6.12	Pakkefeilrate versus pakkestørrelse, $N_s = 4$	54
6.13	Pakkefeilrate versus pakkestørrelse, $N_s = 6$	54
6.14	Pakkefeilrate versus pakkestørrelse, $N_s = 8$	54
6.15	Pakkefeilrate versus antall noder	56
6.16	Pakkefeilrate versus antall noder	56
6.17	Pakkefeilrate versus pakkestørrelse	57
6.18	Pakkefeilrate versus pakkestørrelse	57
6.19	Zigbee: PER versus antall noder	58
6.20	CC2420 effekt og energiforbruk	60
6.21	Aktivitetsforløp i en superramme	61
6.22	Nodens levetid i forhold til sendereffekt og pakkestørrelse . . .	62
6.23	Hendelsesforløp for pakketransmisjon UWB	63
6.24	Levetid $(UWB)^2$ i forhold til ulike pakkestørrelser og N_s . . .	65
6.25	Levetid $(UWB)^2$ i forhold til ulike pakkestørrelser og N_s . . .	65
6.26	Levetid DCC-MAC i forhold til ulike pakkestørrelser og RCPC koderater	66
6.27	Levetid DCC-MAC i forhold til ulike pakkestørrelser og RCPC koderater	66
A.1	CSMA/CA algoritmen	79

Tabeller

4.1	$(UWB)^2$ versus IEEE 802.15.4 MAC	40
6.1	Simuleringsparametre	49
B.1	Statistiske verdier av pathlossparametrene	82
C.1	Parametre i $(UWB)^2$	86

Akronymer

<i>(UWB)²</i>	<i>Uncoordinated Baseborn Wireless MAC for UWB networks</i>
<i>ACK</i>	<i>Acknowledgement</i>
<i>AF</i>	<i>Application Framework</i>
<i>APDU</i>	<i>Application Protocol Data Units</i>
<i>APL</i>	<i>Application Layer</i>
<i>APS</i>	<i>Application Support</i>
<i>ARQ</i>	<i>Automatic Repeat Request</i>
<i>AWGN</i>	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
<i>BPSK</i>	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
<i>BTMA</i>	<i>Busy Tone Multiple Access</i>
<i>CAP</i>	<i>Contention Access Period</i>
<i>CCA</i>	<i>Clear Channel Assessment</i>
<i>CDMA</i>	<i>Code Division Multiple Access</i>
<i>CFP</i>	<i>Contention Free Period</i>
<i>CRC</i>	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
<i>CSMA/CA</i>	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
<i>CSS</i>	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
<i>DCC</i>	<i>Dynamic Channel Coding</i>
<i>DCF</i>	<i>Distributed Coordination Function</i>
<i>DS</i>	<i>Direct Sequence</i>
<i>DSSS</i>	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
<i>DTR</i>	<i>Directly Transmission Region</i>
<i>EKG</i>	<i>Elektrokardiogram</i>

<i>ED</i>	<i>Energy Detection</i>
<i>ER</i>	<i>Expected Region</i>
<i>FB</i>	<i>Fraksjonal Båndbredde</i>
<i>FCC</i>	<i>Federal Communications Commission</i>
<i>FEC</i>	<i>Forward Error Correction</i>
<i>FFD</i>	<i>Full Function Device</i>
<i>GCD</i>	<i>Greatest Common Divisor Function</i>
<i>GTS</i>	<i>Guaranteed Time Slots</i>
<i>ISM</i>	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
<i>IM</i>	<i>Interference Mitigation</i>
<i>LAR</i>	<i>Location Aided Routing</i>
<i>LC</i>	<i>Link Confirm</i>
<i>LE</i>	<i>Link Establishment</i>
<i>LOS</i>	<i>Line of Sight</i>
<i>LR-WPAN</i>	<i>Low-Rate Wireless Personal Area Network</i>
<i>LQI</i>	<i>Link Quality Indication</i>
<i>MA</i>	<i>Multipel Aksess</i>
<i>MAC</i>	<i>Medium Access Control</i>
<i>MLME</i>	<i>MAC layer management entity</i>
<i>MMSE</i>	<i>Minimum Mean Square Error</i>
<i>MPDU</i>	<i>MAC Protocol Data Units</i>
<i>MRC</i>	<i>Maximum Ratio Combining</i>
<i>MRTW</i>	<i>Modified Receiving Template Waveform</i>
<i>MSI</i>	<i>Maximum Sustainable Interference</i>
<i>MUI</i>	<i>Multiuser Interference</i>
<i>NBI</i>	<i>Nærbandsinterferens</i>
<i>NIB</i>	<i>Network Information Base</i>
<i>NLDE</i>	<i>Network Layer Data Entity</i>
<i>NLME</i>	<i>Network Layer Management Entity</i>
<i>NLOS</i>	<i>non Line of Sight</i>
<i>NS2</i>	<i>Network Simulator 2</i>
<i>OC</i>	<i>Optimum Combining</i>
<i>OFDM</i>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
<i>OOK</i>	<i>On-Off Keying</i>
<i>OSI</i>	<i>Open Systems Interconnection</i>
<i>O-QPSK</i>	<i>Offset-Quadrature Phase Shift Keying</i>
<i>PAM</i>	<i>Pulsamplitudemodulasjon</i>
<i>PAN</i>	<i>Personal Area Network</i>
<i>PD</i>	<i>PHY data service</i>
<i>PER</i>	<i>Packet Error Rate</i>

<i>PHY</i>	<i>Physical Layer</i>
<i>PLME</i>	<i>Physical Layer Management Entity</i>
<i>PIB</i>	<i>PHY PAN Information Base</i>
<i>PM</i>	<i>PHY management service</i>
<i>PN</i>	<i>Pseudo-random Noise</i>
<i>POS</i>	<i>Personal Operating Space</i>
<i>PPDU</i>	<i>PHY Protocol Data Units</i>
<i>PPM</i>	<i>Pulsposisjonsmodulasjon</i>
<i>PRNG</i>	<i>Pseudo-random number generator</i>
<i>PSMA</i>	<i>Pulse Sense Multiple Access</i>
<i>RCPC</i>	<i>Rate-Compatible Punctured Convolutional</i>
<i>REQ</i>	<i>Request</i>
<i>RESP</i>	<i>Response</i>
<i>RFD</i>	<i>Reduced Function Device</i>
<i>RS</i>	<i>Reed Solomon</i>
<i>RTS</i>	<i>Request to Send</i>
<i>SAP</i>	<i>Service Access Point</i>
<i>SPDU</i>	<i>SSCS protocol data units</i>
<i>SINR</i>	<i>Signal-to-noise-interference ratio</i>
<i>SSCS</i>	<i>Service Spesific Convergence Sublayer</i>
<i>TDMA</i>	<i>Time Division Multiple Access</i>
<i>TH</i>	<i>Time Hopping</i>
<i>UWB-IR</i>	<i>Ultra Wide Band impulseradio</i>
<i>WLAN</i>	<i>Wireless Local Area Network</i>
<i>ZDO</i>	<i>Zigbee Device Object</i>

KAPITTEL 1

Innledning

Ved helseinstitusjoner må pasienter overvåkes ved behandling og restitusjon. Dette vil være overvåkning av vitale kroppsfunksjoner som for eksempel EKG og blodtrykk. Bruk av trådløse sensornettverk til denne overvåkningen vil gi flere fordeler i forhold til kabelbaserte løsninger. Bevegeligheten til pasientene vil bli større, samt at det vil gi muligheten for å overvåke pasienter utenfor helseinstitusjonens fire vegger. Pasienters velvære og oppholdstid på helseinstitusjonen har også betydning for restitusjonstiden. En overgang til trådløse systemer vil derfor kunne være med på å øke pasienters velvære og redusere restitusjonstiden.

Ved bruk av trådløse sensornettverk stilles det en rekke krav. For det første må påliteligheten til systemet være høy og robustheten stor, siden bruksområdet er overvåkning av vitale kroppsfunksjoner. Det vil også være viktig at responstiden til enhetene er lav, slik at det ikke skapes forsinkelser i systemet. I tillegg må enhetene som skal benyttes være av en størrelse som gjør at det er mulig å montere disse på pasienten uten at de skaper ubehag. I noen tilfeller vil det også være aktuelt å operere sensorer og radiosendere inn i pasienten slik at størrelsen på disse har stor betydning. I forhold til kabelbaserte løsninger vil trådløse sensornettverk bestå hovedsakelig av enheter som er batteridrevet. Det stilles derfor store krav til lavt energiforbruk og enheter som opereres inn i pasienter har ofte et krav om en levetid på 10 år.

Det finnes per dags dato flere standarder for trådløse systemer, deriblant Zigbee/IEEE 802.15.4 og Bluetooth. Disse er allerede godt etablerte standarder for trådløse nettverk og brukes i dag til blant annet kommunikasjon mellom mobiltelefoner og i industrielle sensornettverk. Zigbee er en standard for lavrate nettverk som skal kunne brukes i applikasjoner som krever lave datarater og lavt effektforbruk. Ultra Wide Band impulsradio er en ny teknologi som har fått økt oppmerksomhet etter at FCC frigjorde et stort frekvensbånd fra 3,1 til 10,6 GHz. Det er foreløpig ikke utviklet en kommersiell standard som benytter denne kommunikasjonsteknikken, men det er ventet at den kommende IEEE 802.5.4a standarden vil inneholde fysiske lag basert på UWB-IR. Denne standarden er en viderføring av IEEE 802.15.4 der hovedfokus er lav datarate, lavt effektforbruk og lav kostnad.

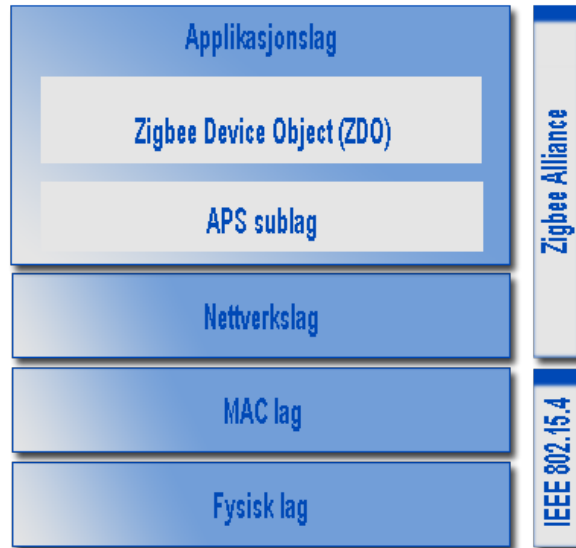
Bruk av UWB-IR vil gi mange nye utfordringer i forhold til bruk av tradisjonell smalbandsteknologi. UWB-IR baserer seg på utsendelse av svært korte pulser, i størrelsesorden nanosekunder, i forhold til et signal modulert med en bærebølge. Ved konstruksjon av et MAC lag for UWB-IR må man derfor ta hensyn til de unike egenskapene slike signaler har og finne løsninger på problemer som bruk av denne kommunikasjonsteknikken innfører. Sentrale problemer vil være synkronisering, tilgang til mediet, sovehåndtering og interferenskontroll av interfererende UWB-IR enheter. Et nettverk basert på UWB-IR vil også sameksistere med andre trådløse systemer, som vil kunne skape interferens og degradere ytelsen. Denne interferensen må derfor enten unngås eller dempes.

Oppgaven er strukturert på følgende måte. Kapittel 2 og 3 inneholder en teoretisk del som omhandler henholdsvis Zigbee og Ultra Wide Band. Videre i kapittel 4 beskrives problemer og utfordringer ved konstruksjon av et MAC lag for UWB-IR der det vil bli tatt for seg krysslagsoptimering av stakken og hvordan UWB-IR kan implementeres i den eksisterende Zigbee stakken. Kapittel 5 inneholder en beskrivelse av problemer og løsninger med hensyn på interferens fra nærbåndssystemer. I kapittel 6 beskrives simuleringsoppsettet, scenarioene og resultatene fra de utførte simuleringene samt en estimering av energiforbruket ved bruk av Zigbee og UWB-IR. Det siste kapittelet, kapittel 7, inneholder diskusjon og konklusjon.

KAPITTEL 2

Zigbee/802.15.4

Zigbee/802.15.4 standarden er en *Low Rate-Wireless Personal Area Network* (LR-WPAN) standard utviklet av Zigbee alliance og IEEE 802.15.4. Disse to gruppene jobbet først individuelt med standardiseringen, men inngikk et samarbeid om dette senere. Zigbee er det kommersielle navnet på denne teknologien. Zigbee stakken er bygget opp av flere lag der hvert lag yter en gruppe tjenester til laget over. Stakk er et navn på laginndelingen av de ulike nivåene i kommunikasjonsprotokollen. Den er basert på den kjente 7-lags *Open Systems Interconnection* (OSI) modellen, men kun de lagene som er relevante for å oppnå funksjonaliteten i det tenkte markedsområdet er definert. IEEE 802.15.4-2003 standarden definerer det fysiske- (PHY) og *medium access control* (MAC) laget mens Zigbee alliance tok for seg de øverste lagene og den samlede utviklingen. Zigbee er designet for bruk i applikasjoner som krever lave datarater og lavt effektforbruk og skal i tillegg være billigere og enklere enn andre WPAN protokoller som for eksempel Bluetooth [1]. Figur 2.1 viser Zigbee stakken.



Figur 2.1: Zigbee Stakken

2.1 LR-WPAN

Et LR-WPAN er et enkelt og lavkostnads kommunikasjonsnettverk der hov- edmålene er enkel installasjon, pålitelig dataoverførsel, operere med korte distanser, ekstremt lav kostnad og fornuftig levetid på batteriet i forhold til applikasjonen. Dette skal oppfylles samtidig som det er en enkel og fleksibel protokoll. Et LR-WPAN består av to ulike enhetstyper, *full function device* (FFD) og *reduced function device* (RFD). En FFD kan opptre i tre ulike moduser. Enten som en *personal area network* (PAN) koordinator, en koordinator eller en enhet (*device*). En FFD kan snakke med en RFD eller andre FFD'er mens en RFD kun kan snakke med en FFD. Et nettverk må bestå av minst en FFD som er satt som koordinator. RFD er ment for ekstremt enkle applikasjoner, som for eksempel en lysbryter eller en passiv infrarød sensor, og de skal ikke behøve å sende store mengder data. Dette gjør at de kan implementeres ved et minimalt bruk av ressurser og minnekapasitet. En RFD kan kun knyttes til en FFD om gangen [1].

2.2 IEEE 802.15.4 WPAN

Et WPAN består av flere ulike typer komponenter. Den vanligste komponenten er enheten (device). En enhet kan enten være en FFD eller en RFD. Et WPAN består av to eller flere enheter som kommuniserer med hverandre på den samme fysiske kanalen innenfor et *personal operating space* (POS). Et POS er definert som et sirkulært område med en trådløs digital enhet som styres av en person. Et nettverk må inkludere minst en FFD som opptrer som PAN koordinator. Et IEEE 802.15.4 nettverk er del av WPAN standardfamilien selv om dekningsområdet til et LR-WPAN kan strekke seg utenfor POS, noe som typisk definerer WPAN [1].

2.3 Det fysiske laget

Det fysiske laget sørger for et grensesnitt mellom MAC laget og den fysiske radio kanalen. PHY inkluderer en forvaltningsentitet (PLME) som sørger for grensesnittet og funksjonaliteter til lagene over. PLME har også en database over administrerte objekter kalt *PHY PAN information base* (PIB). PHY sørger for to tjenester, *PHY data service* (PD) via tilhørende *service access point* (SAP) (PD-SAP) og *PHY management service* (PM) via PLME's SAP (PLME-SAP). PHY data tjenesten muliggjør overføring og mottak av *PHY protocol data units* (PPDUs) over den fysiske radiokanalen og PHY forvaltningstjenesten er grensesnittet mot lagene over.

PHY laget sørger for aktivering og deaktivering av radio sendere, *energy detection* (ED), *link quality indication* (LQI), kanal seleksjon, *clear channel assessment* (CCA) for *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA) og overføring samt mottakelse av pakker over det fysiske mediet. Radioen opererer i 3 ulike lisensfrie frekvensbånd, 868/915 MHz og 2,4 GHz. 868 MHz anvendes i Europa, 915 MHz anvendes i USA og Australia og 2,4 GHz brukes over hele verden. 868 MHz inkluderer en kanal og gir en rate på 20 kbps. 915 MHz inkluderer 10 kanaler og gir en rate på 40 kbps mens 2,4 GHz inkluderer 16 kanaler og gir en rate på 250 kbps. De 3 båndene anvender *direct sequence spread spectrum* (DSSS) og to ulike modulasjonsteknikker, *Offset quadrature phase shift keying* (O-QPSK) for 2,4 GHz og *binary phase shift keying* (BPSK) for 868/915 MHz. Ved 2,4 GHz mappes hvert datasymbol på 4 bit til en chip på 32 bit og ved 868/915 MHz mappes hvert bit til en chip på 15 bit. Chipratene er 300/600 kchip/s og 2000

kchip/s for henholdsvis 868/915 MHz og 2,4 GHz [1]. Spesifikasjoner for de ulike frekvensbåndene i Zigbee er vist i figur 2.2.

PHY (MHz)	Chip rate (kchip/s)	Modulasjon	Bit rate (kb/s)	Symbolrate (ksymbol/s)
868	300	BPSK	20	20
915	600	BPSK	40	40
2450	2000	O-QPSK	250	62.5

Figur 2.2: Zigbee spesifikasjoner

Senterfrekvensen for kanalene i de ulike frekvensbåndene er definert som følger:

$$F_{c|868} = 868,3[MHz], k = 0 \quad (2.1)$$

$$F_{c|915} = 906 + 2(k - 1)[MHz], k = 1, 2, \dots, 10 \quad (2.2)$$

$$F_{c|2400} = 2405 + 5(k - 11)[MHz], k = 11, 12, \dots, 26 \quad (2.3)$$

$$(2.4)$$

der k er kanalnummer. Krav til mottakerens følsomhet i 2,4 GHz båndet er i standarden satt til $-85dBm$ og sendereffektene er delt inn i følgende steg: $-25dBm$, $-15dBm$, $-10dBm$, $-7dBm$, $-5dBm$, $-3dBm$, $-1dBm$ og $0dBm$.

2.4 MAC laget

MAC sublaget sørger for et grensesnitt mellom lagene over og PHY og muliggjør overføringer av *MAC protocol data units* (MPDUs) over PHY data tjenesten. MAC laget inkluderer en forvaltningsentitet, *MAC layer management entity* (MLME), som sørger for grensesnittet og funksjonaliteter til lagene over. MLME har også en database over administrerte objekter kalt *MAC sublayer PIB*. MAC laget sørger for to tjenester, *MAC data service* via *MAC common part sublayer data SAP* (MCPS-SAP) og *MAC management service* via MLME-SAP. MCPS-SAP sørger for overføring av *service specific convergence sublayer (SSCS) protocol data units* (SPDU) mellom peer SSCS entiteter. SSCS eksisterer begrepsmessig over MCPS. En generell MAC

16 bit	8 bit	0/16 bit	0/16/4 bit	0/16 bit	0/16/4 bit	Variabel	16 bit
Ramme-kontroll	Sekvens-nummer	Destinasjon PAN id	Destinasjons-adresse	Kilde PAN id	Kilde-adresse	Payload	Ramme checksekvens
MAC header						MAC payload	MAC footer

Figur 2.3: Generell MPDU ramme, basert på figur 11 i [1]

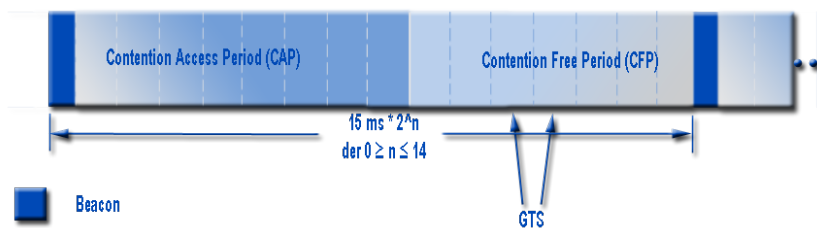
ramme (MPDU) er vist i figur 2.3.

MAC laget er ansvarlig for følgende oppgaver:

- Generere nettverks-beacons hvis enheten er en koordinator
- Synkronisere beacons
- Støtte PAN assosiasjon og disassosiasjon
- Støtte enhetssikkerhet
- Anvende CSMA/CA for kanaltilgang
- Håndtering og vedlikehold av *guaranteed timeslots* (GTS) mekanismen
- Sørge for en pålitelig link mellom to peer MAC entiteter

Carrier sensing i CSMA/CA er en mekanisme der hver node lytter til kanalen og sjekker kanalens status før den sender en pakke. Hvis kanalen ikke er i bruk kan noden sende en pakke, mens hvis kanalen er opptatt må noden utsette overføringen til senere ved bruk av en eksponentiell backoffalgoritme. For å minske sannsynligheten for at to noder sender likt, grunnet at de er utenfor hverandres rekkevidde (*hidden terminal*), defineres også *virtual carrier sense* basert på RTS/CTS mekanismen. Dette er *collision avoidance* delen av CSMA/CA. Denne mekanismen fungerer ved at hver node sender en kort kontrollpakke kalt *Request To Send* (RTS) forut den egentlige pakke-transmisjonen. RTS inkluderer kilden, destinasjonen og varigheten til den etterfølgende overføringen. Mottakernoden responderer denne pakken, hvis kanalen er ledig, med en kontrollpakke kalt *Clear to Send* (CTS). CTS inneholder den samme varighetsinformasjonen. En node som mottar en RTS eller en CTS vil sette sin *Virtual Carrier Sense* indikator for den gitte varigheten og anvender denne informasjonen sammen med fysisk kanalsjekkning når den observerer mediet.

Det kan anvendes to ulike driftsmoduser, *beacon* og *nonbeacon*. I beacon modus deles kanalen inn i superrammer. Formatet av superrammen defineres av koordinatoren og avgrenses av beacons. Beacon-rammene er den første luken i hver superramme og inneholder synkroniseringsinformasjon, PAN identifikasjon og en beskrivelse av strukturen til superrammen, se figur 2.4. Superrammene kan ha en aktiv og en inaktiv del, der koordinatoren i løpet av en inaktiv del ikke skal samhandle med PAN'et og kan gå i en laveffekts modus. Den aktive delen deles inn i 16 like store tidsluker og deles inn i *contention access period* (CAP) og *contention free period* (CFP). Hvis en enhet ønsker å kommunisere i løpet av en CAP mellom to beacons må den konkurrere med andre enheter om tilgang til kanalen ved bruk av *slotted CSMA-CA*. *Slotted* og *unslotted CSMA/CA* er forklart i vedlegg A. Alle transaksjoner må være gjennomført før neste nettverksbeacon ankommer. PAN-koordinatoren har muligheten til å dedikere tidsluker i den aktive delen til visse applikasjoner ved bruk av *guaranteed time slots* (GTSs) i CFP. En GTS kan okkupere mer enn én lukeperiode og PAN koordinatoren kan tildele opp til syv GTS [1].



Figur 2.4: Rammestruktur til en superramme

I nonbeacon enabled nettverk sender ikke koordinatoren ut en nettverksbeacon og det tas i bruk unslotted CSMA/CA. Bekreftelsesrammer sendes uten bruk av CSMA/CA. Det er ikke tillatt med GTS i nonbeacon nettverk. Pakkene synkroniseres ved bruk av forordet i PHY pakken slik at en enhet kan synkronisere seg med en koordinator ved å anmode om datapakke fra koordinatoren.

2.4.1 Dataoverføringsmodell

Det finnes tre ulike typer dataoverføring:

- Til koordinator fra enhet
- Fra koordinator til enhet
- Mellom to peer-enheter

Mekanismene som brukes for hver overføringstype avhenger av om nettverket tillater overføring av beacons.

Dataoverføring til koordinator

I et nettverk som tillater beacons vil en enhet som ønsker å overføre data til en koordinator først vente på nettverksbeaconen. Deretter synkroniserer enheten seg til superrammestrukturen ved hjelp av denne beaconen. Enheten sender så datarammen til koordinatoren ved bruk av slotted CSMA-CA. Koordinatoren bekrefter mottaket av datarammen ved å valgfritt sende en bekreftelsesramme.

I et nettverk uten beacons vil enhetene sende ut sine datarammer til koordinatoren ved bruk av unslotted CSMA-CA. Koordinatorens oppførsel er lik som for nettverk med beacons [1].

Dataoverføring fra koordinator

Når en koordinator i et nettverk med beacons ønsker å sende data til en enhet indikerer den i nettverksbeaconen at en datamelding er i vente. Enhetene lytter periodisk til nettverksbeaconen og hvis det er en ventende innkommende melding sender den en anmodning etter dataene ved bruk av en MAC kommando. Dette skjer ved bruk av slotted CSMA/CA. Koordinatoren bekrefter mottaket av denne anmodningen valgfritt og den aktuelle datarammen sendes ved bruk av slotted CSMA/CA. Enheten bekrefter mottakelsen av datarammen ved å sende en bekreftelsesramme.

I et nettverk uten beacons lagrer koordinatoren dataene og venter til den aktuelle enheten tar kontakt og etterspør disse. Enheten kan ta kontakt ved å sende en MAC kommando til koordinatoren, der den etterspør datarammen, ved bruk av unslotted CSMA/CA. Koordinatoren bekrefter mottakelsen av

etterspørselen og sender eventuelle datarammer til enheten ved bruk av unslotted CSMA/CA. Hvis koordinatoren ikke har noe data til enheten sender den en dataramme med lengde null. I begge tilfellene bekrefter enheten datarammen [1].

Peer-to-peer dataoverføring I et *peer-to-peer*-nettverk kan alle enheter kommunisere med andre enheter innenfor sin egen radiorekkevidde. For å gjøre dette må enhetene enten motta konstant eller synkroniseres med hverandre. I det første tilfellet sender enheten datarammen ved bruk av unslotted CSMA/CA. I det andre tilfellet må andre mål tas i bruk for å oppnå synkronisering noe som ikke er del av IEEE 802.15.4 standarden [1].

2.5 Nettverkslaget

Nettverkslaget sørger for håndtering av MAC laget og danner et grensesnitt mellom applikasjonslaget og MAC laget. Nettverkslaget inkluderer mekanismer som brukes til å koble til og fra et nettverk, tilføre rammesikkerhet og ruting av rammer. I tillegg skal nettverkslaget stå for oppdagelsen og vedlikehold av ruter mellom enheter, oppdagelse av enkelthopp naboer og lagring av nabo informasjon. Nettverkslaget i en Zigbee koordinatore er ansvarlig for å starte et nytt nettverk og tildele adresser til nye enheter [2].

For å danne et tjenestegrensesnitt mot applikasjonslaget inkluderer nettverkslaget to tjenesteentiteter, datatjenesten og forvaltningstjenesten. *Network layer data entity* (NLDE) sørger for datatjenesten via tilhørende SAP (NLDE-SAP) og *network layer management entity* (NLME) sørger for forvaltningstjenesten via tilhørende SAP (NLME-SAP). NLME anvender NLDE for å utføre noen av sine oppgaver og har i tillegg en database over administrerte objekter som kalles *network information base* (NIB). NLDE skal sørge for at en applikasjon har mulighet til å overføre *application protocol data units* (APDU) mellom to eller flere enheter. NLDE sørger altså for at en PDU fra applikasjonslaget blir håndtert riktig ved at den legger til passende protokollheader samt at den blir overført til riktig enhet. NLME skal sørge for at applikasjonslaget har mulighet til å samhandle med resten av stakken og tilbyr følgende tjenester: konfigurering av ny enhet, starte et nettverk, koble til og fra et nettverk, adressering, oppdagelse av naboenheter, oppdagelse av ruter og mottaker kontroll. En generell nettverksramme (*NWK frame*) består

av en *NWK header* og en *NWK payload*. Headeren inneholder informasjon om pakken mens payloaden består av databitene som skal overføres. En slik ramme og innholdet i den er vist i figur 2.5.

16 bit	16 bit	16 bit	8 bit	8 bit	Variabel
Ramme kontroll	Destinasjons-adresse	Kilde-adresse	Radius ^a	Sekvens-nummer ^b	Payload
NWK header					NWK payload

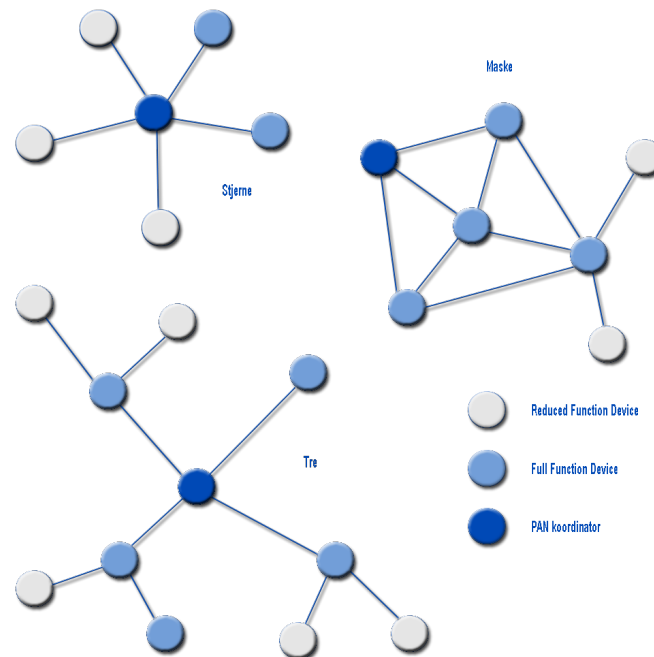
Figur 2.5: Rammeformat NWK ramme, basert på figur 36 i [2]

Nettverkslaget støtter stjerne, peer-to-peer/maske og tre topologier. I stjerne topologien er nettverket kontrollert av en koordinator. Denne enheten er ansvarlig for å initiere og vedlikeholde enhetene i nettverket og alle enheter kommuniserer direkte med koordinatoren. I maske og treetopologier er koordinatoren ansvarlig for å starte nettverket og velge nøkkelparametre, men nettverket kan utvides ved hjelp av rutere. I tre-nettverk flytter rutere data og kontrollerer beskjeder gjennom nettverket ved å bruke en hierarkisk rutings strategi. I slike nettverk er det mulig å ta i bruk beacon-orientert kommunikasjon. Maske-nettverk skal tillate full *peer-to-peer* kommunikasjon og rutere i denne typen nettverk skal ikke sende ut vanlige beacons [2]. Figur 2.6 viser de ulike topologiene.

Alle enheter som befinner seg i et nettverk skal ha en unik 64 bit utvidet adresse. Denne adressen kan brukes for direkte kommunikasjon innenfor PAN eller den kan byttes ut med en kort adresse på 16 bit. Disse adressene tildeles av PAN koordinatoren ved enhetsassosiering [2].

2.6 Applikasjonslaget

Applikasjonslaget består av *application support (APS) sublayer*, *application framework (AF)*, *Zigbee device object (ZDO)* og applikasjonsobjekter definert av produsenten [2]. *APS sublayer* har ansvaret for å koble to enheter sammen basert på deres tjenester og behov og videresende beskjeder mellom disse enhetene. ZDO definerer enhetens rolle i nettverket, som enten er en Zigbee



Figur 2.6: Nettverkstopologier i Zigbee

koordinator eller en endeenhet, oppdager enheter i nettverket, bestemmer typen av applikasjonstjenestene disse enhetene tilbyr og setter opp en sikker kobling mellom enhetene i nettverket.

APS sublayer sørger for et grensesnitt mellom APL og NWK gjennom et sett med tjenester som benyttes av både ZDO og applikasjonsobjektene. Dette gjøres ved hjelp av to entiteter, *APS data entity* (APSDE) via APSDE-SAP og *APS management entity* (APSME) via APSME-SAP. APSDE sørger for overføring av applikasjons PDUer mellom to enheter koblet til samme nettverk og APSME sørger for tjenester for oppdagelse og tilknytning av enheter og har en database over administrerte objekter som kalles *APS information base* (AIB) [2].

KAPITTEL 3

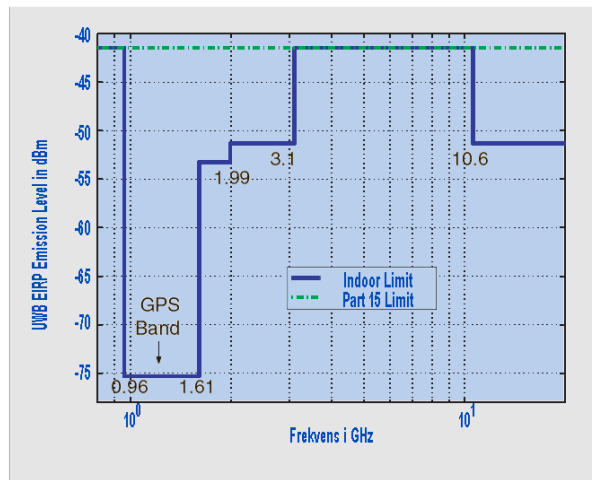
Ultra Wideband

Ultra Wideband (UWB) radio er en raskt voksende teknologi som har mange unike egenskaper som kan gi store fordeler i trådløs kommunikasjon, radar, avbildning og posisjonering. Det er en gammel teknologi som først ble anvendt av Guglielmo Marconi i 1901 da han sendte morsekoder over Atlanterhavet. Ca 50 år senere ble den moderne pulsbaserte overføringen introdusert for verden, og fra 1960 til 1990 ble denne teknologien brukt i militære sammenhenger [3]. UWB ble interessant for det kommersielle markedet da *Federal Communications Commission* (FCC) i 2002 frigjorde et stort frekvensområde med ulisensiert frekvensbånd til bruk ved veldig lave effekter. Denne båndbredden strekker seg fra 3,1 – 10,6GHz og har en tillatt sendereffekt på $-41dBm/MHz$. Spektralmasken til UWB signalet er vist i figur 3.1.

UWB signaler har etter definisjonen en båndbredde større enn 500MHz eller har en $-10dB$ fraksjonal båndbredde (FB) større enn 0.20 [4]. FB er definert slik:

$$FB = \frac{f_H - f_L}{\frac{f_H + f_L}{2}} = \frac{B}{f_c} > 0.2 \quad (3.1)$$

der f_H og f_L er henholdsvis høyeste og laveste cutoff-frekvens og senterfrekvensen er definert som $f_c = (f_H + f_L)/2$.



Figur 3.1: Innendørs spektermaske for UWB, basert på figur 6-1 i [4]

Det er hovedsakelig to teknologier som blir benyttet til UWB kommunikasjon, pulsbasert UWB (UWB-IR) og *Multiband* (MB) UWB der *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) vanligvis benyttes. Pulsbasert UWB kan igjen deles inn i to kategorier, *Time-Hopping* (TH) og *Direct sequence* (DS). Det vil i denne oppgaven hovedsakelig bli fokusert på TH UWB-IR.

3.1 UWB impulsradio

UWB impulseradio (UWB-IR) er den vanligste og mest tradisjonelle måten å sende et UWB signal. Teknikken skiller seg fra vanlige kommunikasjonsteknikker ved at det anvendes korte pulser istedet for et signal modulert med en kontinuerlig bæreølge. Disse pulsene er vanligvis i størrelsesorden nanosekunder og raten disse sendes ut med er svært høy. De mest anvendte modulasjonsmetodene er pulsposisjonsmodulasjon (PPM), pulsamplitudemodulasjon (PAM) og *On-Off Keying* (OOK). I et system med en bruker der hver bit representeres ved hjelp av en puls kan det utsendte signalet generelt uttrykkes matematisk slik:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sqrt{E_b} b_n^0 \cdot p(t - nT_b - \frac{\tau}{2}(1 - b_n^1)) \quad (3.2)$$

der

- E_b er utsendt energi per bit
- $p(t)$ er den utsendte UWB-pulsen
- T_b er bitintervallet
- b_n^0 og b_n^1 er relatert til informasjonsbit

Ved PPM kodes bitene i pulsstømmen ved å forsinke hver enkelt puls i tid i forhold til en referansepuls. For binære PPM signaler er b_n^0 satt til 1, $b_n^1 \in (-1, 1)$ i forhold til om en 1 eller -1 sendes. τ vil da være tidsforskyvningen i forhold til tidsreferansen når -1 sendes. Amplitudene til pulsene som sendes holdes konstant i dette tilfellet. For binær PAM settes b_n^1 til 1 og $b_n^0 \in (-1, 1)$ og er informasjonsbærereren. Her moduleres altså pulstoget ved å endre amplituden på pulsen mens posisjonene til pulsene i tid holdes konstant. Ved bruk av OOK blir b_n^1 satt til 1 og $b_n^0 \in (0, 1)$. Modulasjonen foregår altså ved at man kun sender en puls i det ene tilfellet [5].

For å tillate at flere brukere anvender kanalen samtidig blir det benyttet TH eller DS spredt spektrum. Ved bruk av TH deles tiden inn i rammer som igjen deles inn i chips. En bruker kan sende en puls per ramme og TH-koden angir i hvilken chip den enkelte bruker skal sende. Ved å tildele noder ulike TH-koder vil man dermed kunne unngå kollisjoner mellom transmisjoner. Ved bruk av TH kan signalet fra bruker i skrives generelt som:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sqrt{E_b} b_{i,n}^0 \sum_{j=0}^{N_s-1} p(t - nT_b - jT_f - h_{i,nN_s} + jT_c - \frac{\tau}{2}(1 - b_{i,n}^1)) \quad (3.3)$$

der

- N_s er antall pulser som anvendes for å representere en bit
- T_f er det nominelle pulsrepetisjonsintervallet
- T_c er chipvarigheten
- $\{h_{i,n}\}$ er den pseudotilfeldig hoppesekvensen til bruker i

For DS-UWB kan det utsendte signalet for i 'te bruker skrives som:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sqrt{E_b} b_{i,n}^0 \sum_{k=0}^{N_c-1} a_{i,k} \times p(t - nT_b - kT_c - \frac{\tau}{2}(1 - b_{i,n}^1)) \quad (3.4)$$

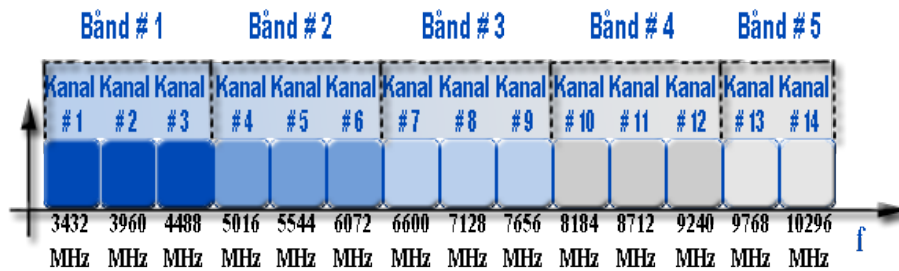
der

- N_c er antall chips brukt for å representere en bit
- $a_{i,k} \in -1, 1$ er det k 'te chipintervallet til den i 'te brukerens pseudotilfeldige sekvens

UWB-IR har flere store fordeler i forhold til tradisjonell smalbandsteknologi. Blant annet er det svært robust mot flerveisforplantning og det kan anvendes til svært nøyaktig posisjonering og avstandsmåling. I tillegg vil UWB-IR signalet være vanskelig å detektere på grunn av den lave energien per frekvensbånd samt at den lave effektspektraltettheten vil gi et lavt interferensnivå i forhold til eksisterende systemer [6]. De korte pulsene fører dessverre også til store utfordringer med tanke på synkronisering der eksakt synkronisering vil føre til en lang kanaltilegningstid.

3.2 Multibånd UWB

På grunn av den store båndbredden som er lagt til rette av FCC er det også mulig å dele dette frekvensbåndet inn i mange kanaler. Multibånd UWB deler inn frekvensbåndet i kanaler på minst 500 MHz. Datatransmisjon for hver enkelt bruker foregår da på ulike subbånd til ulike tidspunkt. Den mest brukte modulasjonstypen er *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). Et OFDM modulert signal består av den parallelle transmisjonen av mange signaler som er modulert med ulike bærebølgefrequenser f_m . Disse bærebølgefrequensene er likt adskilt med Δf i frekvensdomenet. Inndelingen av kanaler er vist i figur 3.2.



Figur 3.2: Multibånd UWB kanaler, basert på figur i [7]

3.3 IEEE 802.15.4a

IEEE 802.15.4a Task Group utvikler for tiden en ny lavrate standard for trådløs kommunikasjon. Formålet til denne gruppen er å revidere IEEE 802.15.4-2003 standarden og danne nye fysiske lag som gir en mer robust ytelse og også gir mulighet for nøyaktig avstandsmåling [8]. Gruppen har definert to nye fysiske lag. Et UWB-PHY basert på en kombinasjon av BPSK og PPM som opererer i 3 ulike frekvensbånd: 250 til 750 MHz , 3,1 til 4,8 GHz og fra 6 til 10,6 GHz . Det andre fysiske laget er basert på *Chirp spread spectrum* (CSS) og opererer i *industrial, scientific and medical* (ISM) båndet fra 2400 til 2481 MHz . Hovedmålene for IEEE 802.15.4a Task Group er lav kostnad, lavt effektforbruk og lave bitrater slik som for IEEE 802.15.4.

Utkastet for IEEE 802.15.4a støtter flere mekanismer for å forbedre koeksistens med andre trådløse systemer som opererer i samme frekvensbånd. Mekanismene som er definert i utkastet er UWB modulasjon med ekstremt lav effektspektraltetthet, lav arbeidssyklus, lav sendereffekt, dynamisk kanalseleksjon og koordinerte Piconett muligheter.

KAPITTEL 4

MAC for UWB-IR

I trådløse nettverk skal kanalen deles mellom mange mobile noder. Hvis alle nodene hadde ukontrollert tilgang til kanalen ville dette kunne føre til mye interferens og kollisjoner. Dermed ville ytelsen til nettverket falle betraktelig og kommunikasjon mellom nodene kunne i noen tilfeller blitt umulig. MAC laget skal koordinere noderes tilgang til kanalen ved å ta i bruk gjensidig eksklusivering mellom noder som sender likt slik at kapasiteten til det trådløse systemet blir utnyttet best mulig. MAC laget skal også sørge for at noder som ikke sender data kan sove og spare energi.

Generelt sett kan trådløse MAC protokoller klassifiseres i to grupper: sentraliserte og distribuerte. I sentraliserte MAC blir det benyttet en kontroller som for eksempel en basestasjon eller et aksesspunkt. Denne kontrollnoden fordeler ressursene mellom alle nodene i nettverket og informerer disse om når de har tilgang til mediet. Nodene kan ut i fra krav til rate og robusthet tildeles mindre eller større tid til å sende på kanalen. Distribuerte MAC har ingen kontrollnode i nettverket og anvender som regel protokoller som baserer seg på tilfeldig tilgang til mediet.

Ved design av et MAC-lag tilpasset et fysisk lag basert på UWB-IR er det flere ting så må tas hensyn til. Restriksjonene i sendereffekt satt av FCC

i UWB nettverk setter høye krav til effektkontroll og gir samtidig nye muligheter innenfor simultane transmisjoner mellom nodepar. Kravet til svært eksakt bitsynkronisering mellom sender og mottaker fører til en lang kanaltilegningstid. Den store båndbredden som er mulig å benytte gir muligheter innenfor simultan transmisjon og oppnåelse av høye overføringsrater. Det eksisterer flere forslag for konstruksjon av MAC lag for UWB-IR som baserer seg på blant annet IEEE 802.15.3 og IEEE 802.15.4/Zigbee. Protokollene til de ulike standardene blir da utvidet eller endret for å tilpasse et fysisk lag basert på UWB-IR. Ny forskning indikerer derimot at en stakk for UWB ikke bør ha den tradisjonelle lagoppdelingen der det er et klart skille mellom for eksempel MAC laget og det fysiske laget, men istedet benytte seg av en krysoptimering mellom lagene [5].

4.1 Multippel aksess

Multippel aksess (MA) er å sørge for at simultane transmisjoner støttes, kanaltildelingen som må gjøres for hver av transmisjonene i nettverket og å fjerne eller dempe den interferensen som måtte oppstå. For å kontrollere tilgangen til mediet kan enten nodene kjempe om denne tilgangen, tilfeldig tilgang, eller man kan ta i bruk en fast tildelingsmekanisme. Tilfeldig tilgang til kanalen er en god løsning i nettverk der det er sporadisk trafikk, mens fastsatt kanaltilgang gir fordeler der det er en kontinuerlig strøm av pakker på kanalen.

DS og TH UWB er de vanligste metodene for å tillate samtidige transmisjoner i UWB-IR nettverk. I DS-UWB spres transmisjonen til hver link ved hjelp av pseudotilfeldige sekvenser og mottakeren utfører den motsatte operasjonen. Denne spredningen gjør at man kan tillate simultane transmisjoner av mange uavhengige kodede signaler på det samme frekvensbåndet. TH-UWB sender som nevnt tidligere en puls per ramme og ved bruk av ulike pseudotilfeldige TH-koder mellom nodene vil man kunne oppnå MA. En kontrollnode kan dermed ha oversikt over de andre nodene i nettverket og sørge for at ingen anvender samme kode uten at avstanden mellom de er tilstrekkelig stor. I nettverk uten en sentral kontrollnode trengs det derfor en protokoll som bestemmer hvilken kode som skal anvendes for datatransmisjon og overvåking av pågående trafikk i nettverket. De vanligste tildelingsprotokollene er [5]:

- **Alminnelig kode:** Alle transmisjoner tildeles en alminnelig kode. Hver pakke inkluderer en header med informasjon om destinasjonsadressen. Denne informasjonen sjekkes av hver node for å finne ut om pakken er ment for dem eller ei. Siden alle nodene opererer med samme kode vil kollisjoner oppstå dersom mange transmisjoner foregår samtidig.
- **Mottakerbasert kode:** Hver node tildeles en unik mottakerkode. Denne koden brukes ved all direkte kommunikasjon mellom to noder. Mottakernodene må dermed kun overvåke sin egen mottakerkode. Ulempen med denne løsningen er at hvis flere kilder forsøker å sende til samme node samtidig vil det oppstå kollisjoner.
- **Senderbasert kode:** Hver node tildeles en unik senderkode. Senderene anvender sin egen kode for transmisjoner til en mottaker. Dette fører til at simultane transmisjoner mellom flere noder ikke kolliderer, men mottakerene må ha en mekanisme for å være klar over at den skal motta en pakke.

I smalbåndskommunikasjon foregår transmisjonene i en enkelt kanal og kommunikasjon mellom flere noder som er nærme hverandre vil dermed kollidere. Dette problemet er vanligvis løst ved hjelp av protokoller som tar i bruk ekskluderingsmekanismer som for eksempel CSMA/CA i Zigbee. Slike løsninger fører til mye ekstra kontrollinformasjon som må utveksles slik at ved implementasjon i et UWB-IR nettverk vil ytelsen til systemet senkes betraktelig samtidig som det vil føre til flere kollisjoner mellom pakker og kontrollpakker. I et lavrate UWB-IR nettverk vil sendereffekten være svært lav slik at to transmisjonspar kan kommunisere samtidig så lenge de er langt nok fra hverandre. Interferensen mellom de to parene vil da være neglisjerbar. *Exclusive region* er et konsept som definerer et romlig mål stort nok til at nodeparene kan kommunisere likt, og vil være det optimale valget med tanke på throughput [5]. Å bestemme den optimale exclusive region er derimot en vanskelig oppgave. Små størrelser vil kunne gi flere simultane transmisjoner, men samtidig også føre til at interferensen blir stor. I tillegg vil en protokoll med exclusive region føre til økt uveksling av kontrollpakker noe som ikke er ønskelig. Det er derfor ønskelig å forsøke å bekjempe interferensen istedet for å unngå den.

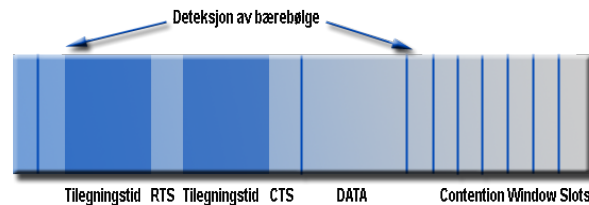
4.2 Multibrukerinterferens

I TH UWB-IR oppstår multibrukerinterferens (MUI) på grunn av at pulskollisjoner mellom den ønskede transmisjonen og interfererende transmisjoner. Hvis den interfererende noden er svært nærme mottakernoden vil den interfererende effekten være stor noe som vil føre til en betraktelig forværing av mottakelsen. Dette kan løses ved å benytte ekskluderingsområder der noder som befinner seg innenfor ekskluderingsområdet til en annen node ikke kan sende samtidig som den aktuelle noden. Dette fører til at det må implementeres en teknikk for å informere noder om størrelsen på ekskluderingsområdet og om når en transmisjon er igangsatt. En annen mulighet er å ta i bruk et konsept kalt *interference mitigation* (IM) [9]. Hos senderen moduleres bitene over N_s pulser med en hoppesekvens. Mottakeren anvender et matchet filter som punktprøver inngangen på det ønskede hoppeintervall og genererer en symboldesisjonsvariabel. Hvis en punktprøving har et svært stort energinivå er det sannsynlig at det har oppstått en kollisjon med en sterk interfererende kilde. Ved bruk av IM anvender man en terskelverdi for akseptabel energi i mottatte pulser og fjerner pulser som overgår denne verdien og bruker de resterende pulsene for deteksjon [5]. Bruk av denne metoden krever altså ingen koordinering mellom sendere i form av et ekskluderingsområde.

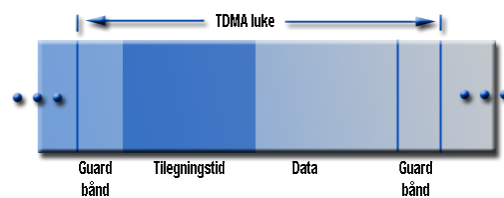
4.3 Reduksjon av overhead

Enhver MAC protokoll innfører en form for overhead som for eksempel kontrollmeldinger og headere i pakker. Et stort problem i UWB-IR nettverk er kanaltilegningstiden på grunn av det strenge kravet til synkronisering [6] [5]. Figur 4.1 viser invirkningen av kanaltilegningstiden i en protokoll som CS-MA/CA der kanaltilegningstiden vil utgjøre en mye større tidsperiode enn selve mottakelsen av kontrollpakken. Figur 4.2 viser samme scenario for TD-MA. En løsning kan være å øke pakkestørrelsen, men i trådløse nettverk kan dette føre til stor sannsynlighet for pakketap. Dette vil innføre en annen type overhead ved retransmisjon av tapte pakker og føre til en forsinkelse i systemet. En annen mulig løsning på dette problemet kan være å ikke avslutte den fysiske oppkoblingen mellom to noder selv om det ikke finnes data å overføre. Man opprettholder synkroniseringen mellom sender og mottaker ved å sende små kontrollpakker med lav rate. En node vil dermed slippe å resynkronisere seg hver gang den skal overføre en pakke, men samtidig vil sendertiden til hver node øke. Dette vil føre til at levetiden til noden re-

duseres samt at interferensen økes hos andre transmisjoner. Det er derfor ønskelig å minimere bruken av kontrollpakker slik at innvirkningen av den lange kanaltilegningstiden blir minst mulig.



Figur 4.1: Kanaltilegningstid for CSMA/CA protokollen, basert på figur i [6]



Figur 4.2: Kanaltilegningstid for TDMA protokollen, basert på figur i [6]

4.4 Rate og effektkontroll

For å sørge for en best mulig utnyttelse av båndbredden og oppnå ønsket tjenestekvalitet må det tas i bruk en effektiv protokoll som bestemmer raten og sendereffekten en node skal anvende i transmisjonen. Kontroll av sender-effekten er viktig på grunn av det kjente *near-far* problemet, der to noder forsøker å sende til samme node og den ene befinner seg mye nærmere mottakeren enn den andre. Signalet fra noden lengst unna opplever dermed mye større interferens på kanalen og det blir vanskelig hvis ikke umulig å motta signalet hos mottakeren. Sendereffekten og raten til hver oppkobling må derfor kontrolleres slik at nettverket er stabilt og man oppnår ønsket ytelse.

For TH UWB-IR vil tildeling av ulike TH-koder kunne tillate simulane transmisjoner. Near-far problemet vil likvel kunne føre til ikke tolererbar interferens fra simultane transmisjoner. Hvis antall noder i nettverket er stort og de ulike oppkoblingene benytter uavhengige pseudotilfeldige koder kan den

kombinerte MUI approksimeres som additiv hvis Gaussisk støy. SINR hos mottakeren i den i 'te oppkoblingen kan da uttrykkes som:

$$SINR_i = \frac{P_i h_{ii}}{R_i(\eta_i + T_f \sigma^2 \sum_{j=1, j \neq i}^N P_j h_{ji})}, i = 1, 2, \dots, N \quad (4.1)$$

der P_i er den gjennomsnittelige sendereffekten til oppkobling i , h_{ij} er veitapet fra oppkobling i 's sender til oppkobling j 's mottaker, R_i er bitraten i oppkobling i , η_i er bakgrunnsstøy pluss interferens fra andre systemer, T_f er pulsurepetisjonsintervallet og σ^2 er en parameter avhengig av pulsformen. Hvis pålitelighet ikke er høyeste prioritet vil man ut i fra likning 4.1 se at hver sender enten skal sende med maksimal sendereffekt eller ikke sende i det hele tatt. Noden i oppkobling i som øker sin sendereffekt vil da øke SINR hos mottakeren som igjen vil gi en høyere oppnåelig rate. Samtidig vil dette føre til økt interferens i andre transmisjoner, men dette tapet kan kompenseres for ved gevinsten i oppkobling i [5].

For å oppnå effektiv effektkontrollering i sentraliserte nettverk må kontrollnoden ha informasjon om sendereffekten til hver enkelt node og veitapet til hver oppkobling. Dette fører til mye kontrollinformasjon noe som ikke vil være gunstig. For et distribuert nettverk vil nodene selv måtte bestemme sendereffekt og rate for hver transmisjonsforespørsel. Valget av sendereffekt og rate vil her være basert på lokale målinger i den aktuelle noden og informasjon fra kontrollpakker. For å unngå hyppige endringer av effekt og rate har hver oppkobling en interferensmargin kalt *maximum sustainable interference* (MSI). MSI angir hvor mye ekstra interferens som tolereres og sendes periodisk med kontrollpakker over en kontrollkanal [5].

I noen tilfeller vil det være fordelaktig å endre raten i en overføring fremfor sendereffekten. Dette er i situasjoner der det forekommer deep fading der en protokoll basert på effektkontrollering vil øke sendereffekten betraktelig for motvirke fadingen [5]. Denne økningen vil føre til sterk interferens hos andre noder. Ratekontroll tilpasser datatransmisjonsraten i forhold til kanalforholdene ved å legge til redundans slik at mottakeren kan tolerere flere korrupte bit ved dekoding. Endringen av rate kan gjøres ved adaptiv kanalkoding slik som RCPC beskrevet i 4.5.4 eller ved endre parametrene i det fysiske laget. Raten endres her ved å øke eller minke antall pulser som sendes per bit, chip puncturing der senderen ikke sender pulser i alle chipene eller ved å endre chipintervallet.

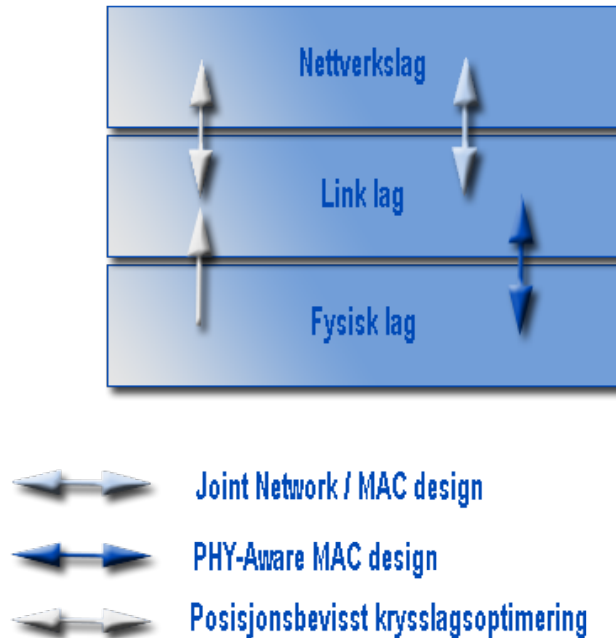
4.5 Krysslagsoptimering

I tradisjonell design er det et klart skille mellom det fysiske laget og MAC laget. Hovedformålet til MAC laget er da å koordinere tilgangen til det fysiske laget og hindre at flere sender samtidig. Samtidig sørger MAC laget for at noder sover når de har mulighet. Det fysiske laget har ansvaret for den faktiske overføringen av bit mellom to noder som kommuniserer og kontrollerer også raten og effektnivået ved denne transmisjonen. Et fysisk lag basert på UWB-IR gir muligheter til å ta i bruk nye teknikker for å designe en effektiv stakk. For å utnytte de ulike karakteristiske egenskapene og designe en stakk som gir bedre ytelse kan det derfor være fornuftig å krysslagsoptimere stakken [5]. Det vil si at det kan utveksles informasjon mellom de forskjellige lagene i motsetning til et tradisjonelt oppsett som OSI modellen. MAC laget kan dra nytte av informasjon fra både nettverkslaget og det fysiske laget for å øke ytelsen til systemet. Det kan for eksempel være informasjon som kanalstatus, lokalisering og avstandsinformasjon og rutingsinformasjon slik som vist i figur 4.3. Man kan dermed ta nytte av den store båndbredden, den lave sendereffekten, fordeler som følger ved transmisjon av pulser og utnytte posisjonerings- og avstandsmålingsmulighetene.

4.5.1 Location-Aware MAC

En av fordelene med UWB-IR er at det gir muligheten til svært nøyaktig avstandsmåling og posisjonering. Denne informasjonen kan utveksles mellom nodene i nettverket slik at nodene kan utnytte denne informasjonen ved blant annet rate og effektkontroll i nettverket. Basert på lokasjonsinformasjonen mellom kommunikasjonsparet kan effektnivået justeres og kanaliseringensparametre og velges slik at det oppnås ønsket signal-støy forhold. Informasjonen kan også benyttes ved rutingen i nettverket. Dette kan redusere overhead betraktelig ved at nodene ikke trenger å benytte den vanlige floodingmekanismen. Når en node skal finne en rute fra a til b kan den dermed velge et mindre antall noder å søke blant ved å utnytte lokaliseringinformasjonen om nabonodene. Samtidig kan nodene ut i fra informasjonen si noe om hvor tett befolket området er slik at parametrene kan justeres etter de gitte forholdene. UWB^2 protokollen er krysslagsoptimert og lokasjonsbasert MAC protokoll. Denne er beskrevet senere i kapittel 4.6.5.

Location Aided Routing (LAR) er en rutingsprotokoll som utnytter lokalisering-



Figur 4.3: Krysslagsdesign for UWB, basert på figur i [5]

ingsinformasjonen til nodene [10]. Hvilken rute som skal benyttes bestemmes på bakgrunn av følgende parametre:

- Kildens posisjon
- Destinasjonens posisjon
- Terminalens maksimale hastighet

Antar at en terminal S starter prosedyren for å finne en rute til destinasjonen D ved tidspunktet $t = t_1$ og at siste oppdatering om D 's lokasjon var i tidspunktet $t = t_0$. Ved å anvende informasjonen om den maksimale hastigheten til D kan S beregne avstanden D har forflyttet seg i løpet av tiden $t_1 - t_0$. Den nåværende posisjonen til D er da innenfor et sirkulært område sentrert rundt D 's siste plassering. Denne regionen kalles *expected region* (ER) og indikerer hvilken sone av nettverket som må nås av ruteforespørselspakken. En node vil dermed kun sende forespørselspakker i retning ER slik at man reduserer antall slike pakker i som sendes i nettverket.

4.5.2 Joint Routing/MAC i multihopp UWB transmisjoner

I multihopp UWB nettverk vil det være større utfordringer med tanke på routing i forhold til et enkelthopp tilfelle. En optimal rute gjennom nettverket må velges på bakgrunn av trafikkfordelingen i nettet og ut i fra hvilken rate og effekt som anvendes i de forskjellige oppkoblingene. MAC parametre som rate og effekt må derfor kontrolleres og endres i forhold til disse rutevalgene slik at ytelsen i nettverket optimaliseres. Denne gevinsten oppnås derimot på bekostning av større kompleksitet.

4.5.3 PHY-Aware MAC

I PHY-Aware MAC design har MAC-laget tilgang til noen eller alle parametrene i det fysiske laget og kan dermed for eksempel tilpasse raten og effekten til interferensnivået. Dette vil gi en mer optimal MAC/PHY konstruksjon i forhold til den ordinære laginndelingen [11].

I lavrate nettverk slik som biomedisinske sensornettverk er det et strengt krav til energiforbruk. Et PHY-Aware MAC kontrollerer interferensen og tilgangen til den delte kommunikasjonskanalen med det formålet å maksimere levetiden til nodene i nettverket samtidig som den maksimale raten som tilbys nodene er tilstrekkelig stor. Fawal m.fl. [11] klassifiserer tre hovedfunksjoner som er viktige i implementasjon av et PHY-Aware MAC: interferenskontroll, tilgang til destinasjonen og sovekontroll av nodene.

Interferenskontroll

I et nettverk vil noder skape interferens for hverandre. Hver enkelt node kan kontrollere interferensen den skaper for andre noder i nettverket ved å endre sendereffekten som anvendes ved transmisjon eller tidspunktet pakken overføres. En annen mulighet er at sendernoden som opplever en økning i interferens fra andre brukere tilpasser raten i forhold til denne interferensen slik at pakken fortsatt kan dekodes hos mottaker.

Transmisjonsraten er ofte implementert som en funksjon av kanalforholdene og da spesielt dempningen i kanalen mellom sender og mottaker. En annen mulighet er å tilpasse raten som funksjon av den nåværende interferensen dannet av andre enheter på kanalen. Man kan tilpasse raten ved å endre for eksempel modulasjonsordene eller kanalkoden som anvendes. Denne justeringen kan i tillegg gjøres adaptivt på bakgrunn av tilbakemeldinger fra mottakeren.

Som nevnt kan en node justere sendereffekten i forhold til interferensen. Sendereffekten kan økes slik at mottakeren oppnår et ønsket signal-til-interferens og støynivå (SINR). En slik justering av effektnivå vil også føre til en økning i interferens hos de andre nodene i nettverket. Dette krever derfor en samhandling mellom enhetene i nettverket slik at hver node ikke bare vet den minste effekten den må ta i bruk ved transmisjon for å oppnå ønsket SINR hos mottakeren, men også den høyeste effekten som kan anvendes uten at det skaper for mye interferens i forhold til nærliggende noder.

Man kan også unngå interferensen ved å innføre en ekskluderingsprotokoll slik at man forhindrer at noder sender samtidig og dermed unngå at de interferer med hverandre. I tradisjonelle trådløse systemer implementeres dette ofte med en utveksling av kontrollpakker slik som foreksempel RTS og CTS i IEEE 802.11 standarden.

Tilgang til destinasjon

Under antakelsen om at en node kun kan sende eller motta fra en kilde om gangen er det nødvendig med en protokoll som implementerer dette. Dette kan gjøres ved bruk av ekskludering slik som beskrevet ovenfor. En annen mulighet er å tillate multiaksess ved bruk av TH-koder. Hvordan bruk av ulike TH-koder kan løse dette problemet er beskrevet i kapittel 4.1.

Sovehåndtering

I et biomedisinsk sensornettverk vil levetiden til nodene være svært viktig. Å la noder sove er den mest effektive måten for å spare energi og øke levetiden.

Det er derfor ønskelig å la noder sove mest mulig. Samtidig kan ikke responstiden til noden være for lav i et slikt nettverk. Det må dermed bestemmes en optimal fordeling mellom de to ut i fra kravene til nettverket.

I et tidsinndelt nettverk tas det bruk av en nettverksbeacon som synkroniserer nodene og bestemmer starten på en superramme. Noden lytter periodisk etter denne nettverksbeaconen og får tildelt tid på kanalen. Dermed kan nodene sove den resterende tiden av superrammen da andre noder i nettverket er aktive. I nettverk uten tidsinndeling aktiveres hver node ut i fra sin egen lytteperiode. Sendere som ønsker å kommunisere med andre noder må derfor sende et forord som er lengre enn den maksimale sovetiden. Mottakeren vil dermed garantert våkne i løpet av denne tiden og svare senderen.

4.5.4 DCC-MAC

Dynamic Channel Coding Medium Access Control (DCC-MAC) [12] er en PHY/MAC arkitektur for 802.15.4a liknende nettverk basert på TH-PPM UWB-IR. Det er en desentralisert MAC protokoll og består av to deler, dynamisk kanalkoding og privat MAC.

Protokollen baserer seg på at når en node skal sende en pakke sender den med maksimal tilgjengelig effekt [13]. I tillegg tillater den kilder å sende samtidig så lenge de er utenfor en definert *exclusive region* rundt destinasjonen. Kanalkoden tilpasses interferensen som oppstår ved disse simultane transmisjonene. Interferens som oppstår innenfor en nodes *exclusive region* bekjempes ved hjelp av IM som beskrevet i kapittel 4.2.

Dynamisk kanalkoding og voksende redundans

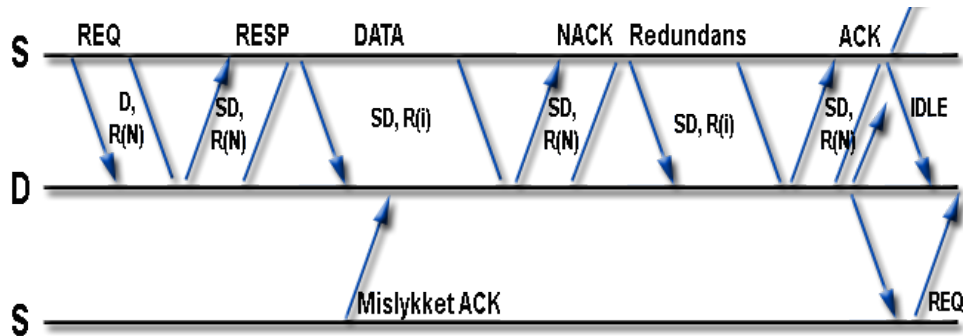
Dynamisk kanalkoding baserer seg på at når en kilde skal sende en pakke så sender den uavhengig av om det foregår andre transmisjoner i parallell og sender med maksimal tilgjengelig effekt. Hos mottakeren endrer kanalforholdene seg i forhold til flere ulike faktorer: samtidige transmisjoner, kanaldempning med ulike forsinkelser og mobilitet. For å utnytte kanalen best mulig må derfor kanalkoden kontinuerlig tilpasses i forhold til høyeste rate kode slik at pakken fortsatt kan dekodes hos mottakeren. I DCC-MAC anvendes det en kraftigere kode enn det som egentlig trenges for å unngå at et pakke går tapt hvis kanalforholdene forverres i løpet av transmisjonen. Hvis kanalforholdene endres betraktelig slik at dekoding ikke er mulig, sendes tilleggsinformasjon inntil pakken kan dekodes, eller til det ikke er mer redundant informasjon tilgjengelig hos senderen. I sistnevnte tilfelle er transmisjonen mislykket. Dette er altså en typisk *Automatic Repeat request* (ARQ) protokoll. Når en pakke skal sendes legger senderen til et *Cyclic Redundancy Check* (CRC) felt i pakken og koder den med laveste rate kode. Mottakeren sjekker innholdet i pakken mot CRC feltet og sender en ACK hvis pakken er korrekt mottatt. I motsatt tilfelle sendes en NACK til senderen og tilleggsinformasjon sendes helt til pakken kan dekodes korrekt. I tilfellet der mottakeren ikke detekterer en innkommende pakke sender den ikke noen NACK pakke tilbake. Senderen går da i en timeout og gjentar overføringen ved bruk av en mer effektiv kode. Når noder kommuniserer for første gang er det nødvendig å bootstrappe den adaptive kodemekanismen. Den første

datapakken kodes med den laveste rate koden, R_N . Ut i fra denne pakken bestemmer mottakeren den optimale koden som senderen skal benytte ved neste transmisjon. For å dekode pakken benyttes en Viterbidekoder. Pakken blir da reprodusert ut i fra bitsene i de valgte grenene i trellisdiagrammet. Dermed kan man så fort man har utfallet av dekodingssteg av en høyere rate kode $R_i > R_N$ som er forskjellig fra R_N eliminere kode R_i og alle koder av høyere rate $R_j > R_i$. Under de gitte kanalforholdene vil altså R_i være den høyeste rate koden som dekodere klarer å dekode. I praktiske sammenhenger er det funnet ut at det kan lønne seg å anvende en kanalkode R_{i+2} hvis den høyeste rate koden er R_i . Dette på grunn av at kanalforholdene aldri er helt stabile. Denne raten sendes tilbake til senderen i bekreftelsespakken. De samme beregningene benyttes for alle etterfølgende datatransmisjoner, men da basert på den nåværende koden istedet for laveste rate kode. Senderen lagrer et register over kanalkodene for et antall mottakere og hvis senderen ikke kommuniserer med mottakeren i løpet av et gitt tidsrom fjernes registerkoden for denne mottakeren og senderen må bootstrappe på nytt som beskrevet over.

Privat MAC

Privat MAC protokollen skal sørge for at flere sendere ikke kommuniserer med én mottaker samtidig. Dette løses ved en kombinasjon av mottakerbaserte og invitasjonsbaserte valg av TH-koder. Hver node har en identisk *pseudo-random number generator* (PRNG) og en MAC adresse som en unik ID. Ved kommunikasjon anvendes enten offentlig eller privat TH-kode. Den offentlige TH-koden til en node med MAC adresse S er TH-koden produsert av PRNG med input S. Den private TH-koden mellom node S og D er TH-koden produsert av PRNG med en sammenfletting av S og D sin MAC adresse som input i PRNG'en.

En datatransmisjon mellom sender og mottaker er vist i figur 4.4. En node S som ønsker å sende data til en node D sender et transmisjonsønske (REQ) på D sin TH-kode. Det antas nå at ingen andre noder sender til D i dette øyeblikket og at D lytter til sin egen TH-kode. Kanalkoden benytter nå den laveste mulige raten R_N slik at alle andre noder innenfor rekkevidde som ønsker å kommunisere med D kan overhøre dette. D besvarer dette ønsket fra S med en responspakke (RESP) ved bruk av den private koden til S og D og den samme koderaten. RESP pakken inneholder kanalkoden R_i som



Figur 4.4: Adaptiv kanalkoding og privat MAC, basert på figur fra [12]

skal anvendes ved transmisjon av datapakkene. Når S mottar denne pakken starter den transmisjon av datapakken på den private koden til S og D. Etter at overføringen er ferdig lytter S etter en bekreftelsespakke (ACK) fra D sendt på den private TH-koden med laveste rate kanalkode R_N . Hvis en NACK mottas sender S voksende redundans til en ACK mottas. Når nodene er ferdige med å sende og motta sender de ut et kort ledigsignal ved bruk av deres egen TH-kode for å informere andre noder om at de er ledige.

Hvis en annen node, S2, ønsker å kommunisere med D samtidig som transmisjonen mellom D og S pågår vil denne noden sende ut en REQ. Dette transmisjonsønsket er sendt på en annen TH-kode enn det som anvendes i den pågående transmisjonen og vil derfor ikke skape destruktiv interferens. S2 vil ikke motta ACK på den utsendte REQ siden D er opptatt og skifter derfor til D's TH-kode og lytter etter ledigsignal. Når dette signalet mottas venter S2 en tilfeldig backofftid og retransmitterer transmisjonsønsket.

4.6 UWB-IR i Zigbee stakken

Stakken i Zigbee er optimert for et smalbands fysisk lag. En implementering av UWB-IR vil derfor føre til at man må gjøre noen endringer i stakken for at samhandlingen mellom et fysisk lag basert på UWB-IR og resten av stakken skal fungere optimalt.

UWB-IR baserer seg på utsendelse av svært korte pulser som fører til at man ikke kan detektere bærebølger, noe som er en del av CCA mekanismen i CSMA/CA protokollen i IEEE 802.15.4. I tillegg vil man som nevnt tidligere få en lang kanaltilegningstid på grunn av kravet til svært eksakt synkronisering mellom sender og mottaker. UWB-IR er ment for bruk i sensor nettverk der en stor del av nodene kan ha svært strenge krav til lavt effektforbruk. Den lave effekten som anvendes til datatransmisjon og den korte pulsvarigheten til UWB-IR signalet gir samtidig nye muligheter ved at man kan tillate mange overføringer samtidig.

I tillegg vil en implementasjon av UWB-IR også gi muligheten til å implementere nye funksjonaliteter, som for eksempel avstandsmåling og posisjonering. Dette er noe som ikke finnes i den eksisterende Zigbee stakken, og de bør implementeres for å få en god utnyttelse av et fysisk lag basert på UWB-IR.

4.6.1 Multippel aksess

CSMA/CA som er brukt i 802.15.4 MAC er en teknikk som baserer seg på CS og RTS/CTS mekanismen, som beskrevet i kapittel 2.4. I denne protokollen blir kanalen funnet opptatt eller ledig ved at noden lytter på kanalen for å se om den kan detektere en bærebølge. Siden dette ikke er mulig ved bruk av UWB-IR må det derfor finnes en løsning på CS problematikken eller tas bruk av en annen protokoll som erstatning for CSMA/CA.

RTS/CTS mekanismen vil på grunn av den lange kanaltilegningstiden føre til at denne protokollen har dårlig ytelse i et UWB-IR nettverk [6]. En mulig løsning på dette kan være å øke pakkelengden, men dette vil igjen føre til større sannsynlighet for pakkefeil [6]. For å minimere antall kontrollpakker som må sendes i nettverket må man derfor enten ekskludere eller endre

RTS/CTS mekanismen eller implementere en annen mekanisme for virtual carrier sensing

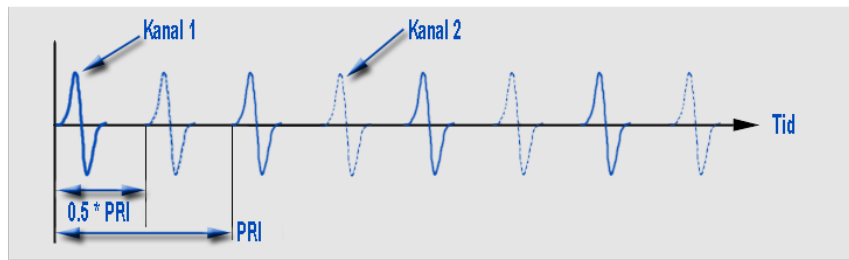
4.6.2 Mulige løsninger

Pulse sensing (PSMA/CA)

For å løse problemet med CS i CSMA/CA kan man ta i bruk *pulse sensing* (PS) som en erstatning for CCA mekanismen i CSMA/CA protokollen [14]. PS er en metode for å detektere et opptatt medium i et puls basert UWB nettverk på lik linje med CS i et smalbandsnettverk. Mekanismen som anvendes i [14] undersøker de spektrale effektkomponentene i det mottatte signalet og bruker denne informasjonen for å detektere en innkommende pakke og sjekke om kanalen er ledig før man sender. Man har da en PSMA protokoll. For å dempe den negative innvirkning fra skjulte noder (*hidden terminal problem*) kan man benytte RTS/CTS mekanismen som i eksisterende IEEE 802.15.4 MAC slik at man får en PSMA/CA protokoll.

Busy signal (BTMA)

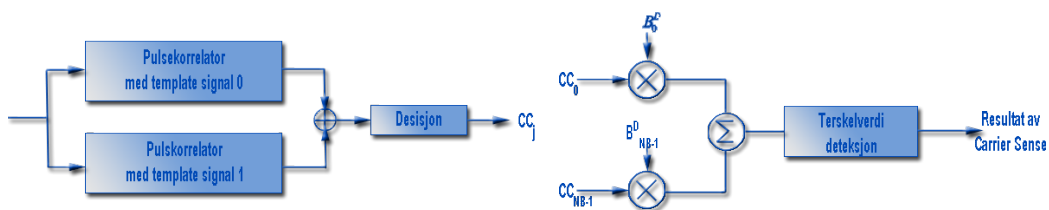
I [15] har de løst problemet med CCA mekanismen på samme måte som ved PSMA/CA. August m.fl. [15] benytter i tillegg en feedback under datatransmisjon. En sender vil da øyeblikkelig vite om en pakke har kollidert og kan spare energi ved å ikke fortsette å sende ødelagte pakker. Dette krever imidlertid at transceiveren har muligheten til operere i en full-duplex modus. I [15] foreslår de en enkel UWB-IR transceiver som oppnår full duplex ved en metode de kaller finkornet halv-duplex. Denne metoden utnytter at UWB-IR signalet ikke sendes kontinuerlig slik som ved et smalbandssignal. Dette scenarioet er vist i figur 4.5. En slik protokoll sørger altså for at kilden blir informert om transmisjonen er suksessfull eller ikke og i tillegg sørger den for at noder innenfor radiorekkevidden til mottakeren ikke sender under transmisjonen. Man har dermed løst *hidden terminal* problemet uten å innføre kontrollpakker som RTS, CTS og ACK.



Figur 4.5: Finkornet *Time Division Half Duplex* med UWB-IR, basert på figur i [15]

BPSK+PPM CSMA

BPSK+PPM CSMA [16] er ny type CSMA protokoll som er tilpasset TH UWB-IR. Denne protokollen tar i bruk to ulike *Pseudo-random Noise* (PN) sekvenser i moduleringen slik at en node som skal sende pakker kan sjekke kanalen og om destinasjonsnoden er opptatt med en annen transmisjon. PN sekvenser er et sett med bits som genereres slik at de er statistisk tilfeldige. Shen m.fl benytter PN sekvenser som er bi-polare noe som vil si at man reverserer den originale fasen til den modulerte pulsen. Dette kan ses på som en BPSK modulering av det originale PPM TH systemet. CS blir løst ved at to unike koder tildeles destinasjonsnoden. En node som ønsker å sende en pakke til destinasjonsnoden sjekker kanalen ved å benytte TH koden og PN koden til destinasjonsnoden. Denne deteksjonsmetoden er vist i figur 4.6.



Figur 4.6: Korrelasjonsdetektor til venstre og terskelverdidetektor til høyre, basert på figur i [16]

Shen m.fl definerer også *directly transmission region* (DTR). Noder som ønsker å kommunisere med en node, men ligger utenfor DTR til denne noden må sende gjennom mellomliggende noder. Noder som ligger utenfor en nodes DTR kan sende samtidig uten at man trenger å bekymre seg for interfer-

ensen disse danner. På denne måten kan hver node fungere som en ruter i et *multi-hop ad-hoc* nettverk. Størrelsen av DTR bestemmes av sendereffekten til kildenoden, der større sendereffekt fører til en større DTR.

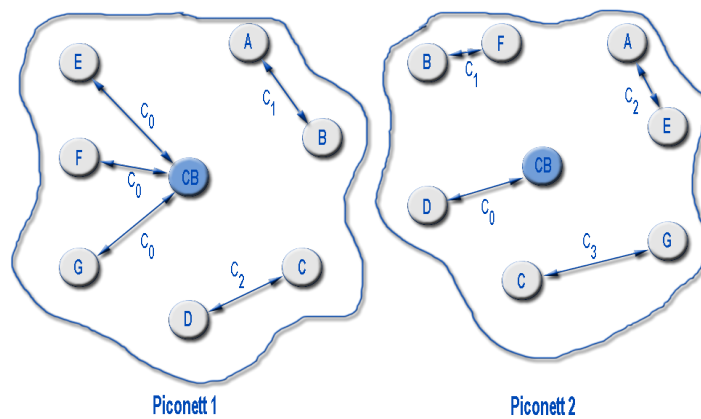
Alhoa

Alhoa er den enkleste formen for multiple aksess. I *pure-Aloha* sender en node hvis den har data å sende og hvis en pakke kolliderer sendes den på nytt senere. Man sjekker altså ikke kanalen før man sender en pakke. Protokollen legger kun til en *cyclic redundancy code* (CRC) i hver pakke for transmisjon og hvis det oppstår en kollisjon anvendes en backoff prosedyre i retransmisjonen av den ødelagte pakken. Pure-Aloha fungerer bra i nettverk med lite trafikk, men ytelsen synker når trafikken og pakkestrørrelsene øker. Ved bruk av TH UWB-IR har man derimot en lav arbeidssyklus og svært korte pulser noe som gir en høyere beskyttelse mot pakkekollisjoner [17].

TH-CDMA

Kumar m.fl. [18] foreslår en protokoll der multippel aksess oppnås ved tildeling av ulike TH koder. Når en node våkner opp og skal innordne seg i et piconett bruker den en basiskode, C_0 , for å kommunisere med kontrollnoden i nettet. For å unngå interferens mellom nærliggende piconett anvendes forskjellige basiskoder. Hver node må derfor ha kjennskap til basiskodene til kontrollnodene. Kontrollnoden lytter alltid til basiskoden for å oppdage innkommende ønsker fra noder i piconettet. Når en node ønsker å kommunisere med en annen node i piconettet sender den en forespørsel til kontrollnoden ved bruk av basiskoden. Denne forespørselen inneholder sender- og destinasjonsnodens ID og kontrollnoden repliserer denne ved bruk av en predefinert kode C_1 . Pakken fra kontrollnoden inneholder informasjon om TH koden, C_i , som skal brukes ved kommunikasjon mellom de to nodene. I tillegg sender kontrollnoden en pakke til destinasjonsnoden, ved bruk av en predefinert kode, med informasjon om den kommende overføringen. Når kommunikasjonen er avsluttet mellom senderen og destinasjonsnoden informerer senderen kontrollnoden om dette ved bruk av C_i koden og kobler seg fra nettet. Kontrollnoden vil ved bruk av denne protokollen kunne sørge for at to noder ikke prøver å kommunisere med en annen node samtidig. I tillegg lagrer kontrollnoden informasjon om de ulike kodene som er tildelt nodene

slik at man unngår at to noder benytter samme kode for overføring. Figur 4.7 viser to piconett med kommunikasjon mellom noder og kontrollnoder (*Code Broker*). Noder har muligheten til å knytte seg til flere piconett samtidig slik at man kan ha kommunikasjon mellom flere piconett. Noder kan også koble seg til piconett ut i fra trafikkmengden og kodetilgjengeligheten innenfor de ulike nettene. Det er også mulig å benytte lokasjonsbasert ruting i mellom noder og piconett.



Figur 4.7: Piconett struktur, basert på figur i [18]

4.6.3 Nettverkstopologier

De eksisterende nettverkstopologiene, stjerne og punkt-til-punkt, i Zigbee stakken gir god nok fleksibilitet for de fleste tenkelige nettverksscenarioer. Dette vil kunne gi bruk av alt fra enkeltoppkoblinger til komplekse maskenettverk [19].

4.6.4 Nye funksjonaliteter

UWB-IR gir muligheten til å implementere funksjonaliteter som avstandsmåling og posisjonering. Dette er noe som sannsynligvis vil ha stor betydning i avansert design av trådløse kommunikasjonsnettverk i fremtiden [4]. Avstandsmåling er en utregning av avstanden mellom en utpekt node og en referansenode. Dette kan gjøres ved at noden som ønsker avstandsinformasjon om en annen node oppretter en punkt-til-punkt kobling til den aktuelle noden.

Denne oppkoblingen brukes av referansenoden for estimere avstanden til den andre noden ved bruk av evalueringsparametre. Disse parametrene er vanligvis basert på enten en evaluering av kanaldempningen eller forplantningsforsinkelsen. Ved bruk av UWB-IR vil man ha muligheten til å gjøre avstandsmåling med svært god presisjon noe som kan utnyttes på mange måter i ressursforvaltning. Dette er noe som kan utnyttes i alt fra effektive effektbesparende protokoller både i MAC og høyere lag samt at man kan anvende informasjonen til ruting og kodetildeling [17]. Zigbee støtter ikke avstandsmåling og posisjonering og for å kunne støtte nye applikasjoner som tar i bruk dette må stakken tilpasset UWB-IR implementeres med dedikerte funksjonaliteter i forhold til å hente, lagre og utveksle avstands og posisjons informasjon.

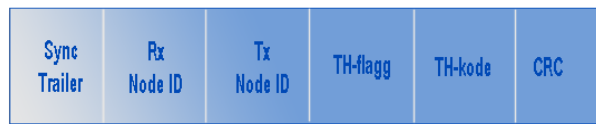
4.6.5 $(UWB)^2$

Uncoordinated Baseborn Wireless medium access controll for UWB nettverk, $(UWB)^2$, er et MAC-lag som er skreddersydd for TH UWB-IR og den kommende IEEE 802.15.4a standarden og er en lokasjonsbasert krysslagsoptimert MAC-protokoll [20] [21]. Protokollen er basert på en kombinasjon mellom Aloha og TH-CDMA. Aloha for mediumaksessering og TH-CDMA for multiaksess. Aloha er valgt på grunn av den store temporale oppløsningen til impulsradio og dermed den lave sannsynligheten for pulskollisjon og motstandsdyktigheten i forhold til multibrukerinterferens. Aloha er kombinert med TH-CDMA for ytterligere å redusere effekten av kollisjoner ved at ulike oppkoblinger i nettverket tildeles forskjellige TH-koder. Protokollen kan enten anvende pure eller slotted Aloha noe som gjør at både sentraliserte og distribuerte nettverksprotokoller kan anvendes.

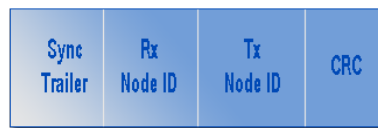
$(UWB)^2$ anvender en kombinasjon av felleskoder og senderkoder. Felleskoder er koder som alle brukere deler og anvendes ved transmisjon av kontrollpakker. For å unngå kodekollisjoner brukes forskjellig faseskift mellom de ulike oppkoblingene. Senderkoder er senderspesifikke koder som brukes ved overføring av datapakker. For å motta en pakke bytter mottakeren til senderens kode.

Pakkeutvekslingen ved oppkobling mellom sender og mottaker kan også brukes for å måle avstanden til de ulike nodene. Ved oppstart utveksler sender og mottakeren en *Link Establishment* (LE) pakke ved bruk av felleskoden.

Denne responderes med *Link Confirm* (LC) pakke som sendes med senderkoden til mottaker. LE PDU og LC PDU er vist i henholdsvis figur 4.8 og 4.9. Til slutt sendes datapakken med senderkoden til senderen. I denne pakkeutvekslingen lagres avstanden mellom sender og mottaker hos begge parter. Strukturen til både kontroll- og dataMACPDU er formet med PDU strukturen i IEEE 802.15.4 som grunnlag slik at $(UWB)^2$ kan integreres i den eksisterende Zigbee stakken. Protokollen sørger også for at hver terminal i har en database over avstandene til naboterminalene med tilleggsattributtene nodeID og tidspunkt målingen fant sted.



Figur 4.8: LE PDU, basert på figur i [21]



Figur 4.9: LC PDU, basert på figur i [21]

For å oppnå synkronisering mellom sender og mottaker legges det til den synkroniseringstrailer til hver pakke. Trailerens implementeres i starten av hver pakke og inneholder et fast antall pulser. Denne synkroniseringstrailer er kjent av alle enhetene i nettverket på forhånd slik at mottakere kan detektere innkommende pakker. Deteksjonen skjer ved bruk av et korrelasjonsfilter som er matchet mot synkroniseringstrailerens. Tabell 4.1 viser likheter og forskjeller mellom IEEE 802.15.4 MAC og $(UWB)^2$.

4.6. UWB-IR I ZIGBEE STAKKEN KAPITTEL 4. MAC FOR UWB-IR

IEEE 802.15.4 MAC	$(UWB)^2$
<i>Datarater på 250, 40 og 20 kb/s</i>	<i>Også mulig i $(UWB)^2$</i>
<i>Stjerne eller ptp operasjon</i>	<i>Mulig i $(UWB)^2$, men med forskjellig kanaltilgangsstrategi. Alle topologier definert i IEEE 802.15.4 MAC kan adopteres uten videre modifikasjoner.</i>
<i>Støtte for lavlatens enheter</i>	<i>Mulig i $(UWB)^2$ så lenge en tidsinndeling benyttes. GTS kan defineres slik som i IEEE 802.15.4</i>
<i>CSMA/CA</i>	<i>Byttes ut med Aloha i $(UWB)^2$. Pure Aloha anvendes i punkt-til-punkt nettverk mens pure/slotted Aloha brukes i stjernenettverk.</i>
<i>Fullstendig handshaked protokoll for overføringspålitelighet</i>	<i>Samme for $(UWB)^2$. Valgfri ACK er allerede i protokollen slik som for IEEE 802.15.4</i>

Tabell 4.1: $(UWB)^2$ versus IEEE 802.15.4 MAC

KAPITTEL 5

Nærbandsinterferens

Ut i fra spesifikasjonene fra FCC vil UWB okkupere et stort frekvensbånd. Et UWB nettverk vil derfor overlape med frekvensbånd anvendt av andre kommunikasjonssystemer. Disse vil kunne skape interferens for enhetene i UWB nettverket og dermed ha innvirkning på ytelsen til UWB systemet. Denne interferensen må derfor bekjempes eller unngås. TH UWB-IR har naturlig immunitet i forhold til nærbandsinterferens (NBI) på grunn av de korte tidsvindene hos mottakeren og den høye korrelasjonen i nærbåndssignaler over korte tidsrom, men på grunn av den lave effektspektraltettheten til UWB signalet er det allikevel forventet at denne interferensimmuniteten ikke er tilstrekkelig for å dempe høye nivåer av NBI [22]. Denne må derfor implementeres mekanismer både i det fysiske laget og MAC-laget som løser dette problemet. Det er også forventet at interferens fra UWB vil kunne påvirke nærbåndssystemer, men dette vil ikke bli sett på i denne oppgaven.

5.1 Effekt av NBI

Den viktigste kilden til interferens i frekvensbåndet 3,1 til 10,6 GHz er IEEE 802.11a WLAN [23]. Denne standarden opererer i 5GHz området og tar i bruk *orthogonal frequency-division multiplexing* (OFDM). Firoozbakhsh m.fl

[24] har tatt for seg hvordan slik interferens vil påvirke et TH UWB-IR system basert på PPM. Denne analysen er gjort ved bruk et nettverk som består av en UWB-sender og mottaker samt en interferende IEEE 802.11a stasjon. Resultatene viser at bitfeilsannsynligheten øker betrakelig under påvirkning av 802.11a og at effekten fra interferensen er avhengig av plasseringen til både UWB senderen og den interfererende stasjonen i forhold til UWB mottakeren. Disse resultatene er i samsvar med en teoretisk analyse av effekten av IEEE 802.11a interferens på UWB systemet i [25]. Denne analysen viser også at slik interferens fører til at sannsynligheten for bitfeil øker. I tillegg til at det finnes andre systemer som opererer i frekvensbåndet satt av til UWB er det forventet at andre trådløse systemer ved andre frekvensområder vil kunne interferere. Dette skjer på grunn av et signal sentrert rundt en gitt senterfrekvens vil gi harmoniske i andre deler av frekvensbåndet.

Effekten fra den interferende kilden er sterkest ved frekvenser der spektral-tettheten til den anvendte pulsformen i UWB-IR systemet er sterkest [26]. Ulike interferende systemer som opererer på forskjellige frekvenser vil altså degradere ytelsen forskjellig avhengig av hvilken del av båndbredden til UWB den sameksisterer med. Giorgetti m.fl [27] tar for seg en RAKE mottaker i et TH UWB-IR system basert på PPM og gir en evaluering av bitfeilsannsynligheten under påvirkelse av NBI. Den interfererende kilden er her satt til å være en sinusformet tonekilde. Den teoretiske analysen viser at den negative effekten fra det interfererende nærbåndssystemet er gitt ved dens frekvens og systemparameterene til UWB systemet. Dermed kan ulike brukere i systemet oppleve forskjellig degradering av bitfeilsannsynligheten under påvirkning av den samme interfererende kilden. Disse analytiske resultatene verifiseres av simuleringer der det er benyttet en interferende kilde med frekvens på 2,412 GHz noe som vil kunne tilsvare Zigbee eller Bluetooth.

5.2 Håndtering av NBI

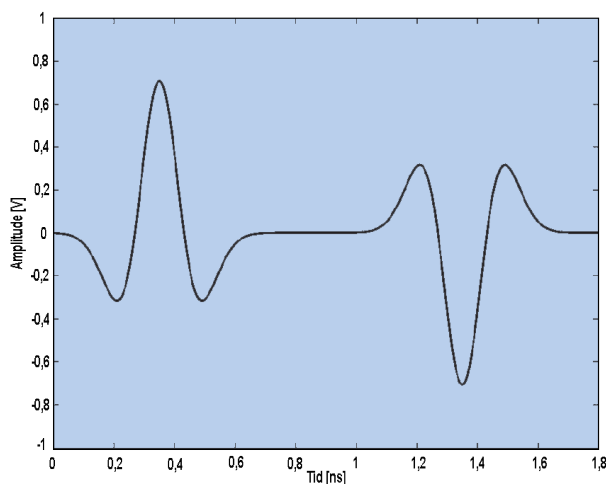
Det vil være flere ulike måter å håndtere interfererende systemer. Man kan forsøke å unngå interferensen ved å anvende andre deler av frekvensbåndet der det ikke eksisterer andre systemer. En annen mulighet er å håndtere interferensen ved å benytte teknikker som demper virkningen av denne.

5.2.1 Pulsforming

I [28] og [26] foreslås bruk av dublettpulser for å dempe interferens fra nærbåndssystemer. En dublettpuls består av to bølgeformer separert fra hverandre. I et system basert på TH UWB vil man ved bruk av en dublettpuls som er adskilt fra vanlig puls med $1/f_0$ kunne fjerne en tone ved f_0 . Bølgeformen til dublettpulsen er gitt som følger:

$$w_{dublett}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}}(w_{rec}(t) - w_{rec}(t - T_{gap})) \quad (5.1)$$

der T_{gap} er adskillelsen mellom pulsene. Ved å justere T_{gap} vil man altså kunne generere nullpunkter ved gitte frekvenser slik at NBI rundt disse frekvenser dempes. Hvis for eksempel T_{gap} settes til $1ns$ vil interferende signaler rundt multiple heltall av $1GHz$ fullstendig fjernes. Figur 5.2.1 viser bølgeformen til en dublettpuls med en adskillelse mellom pulsene på $1ns$. Hvis flere enn én NBI finnes i frekvensbåndet som skal anvendes vil man ved justering av parametrene kunne dempe alle disse. Hvis senterfrekvensene til alle NBI i spekteret er gitt ved f_0, f_1, \dots, f_N , må T_{GAP} settes til $1/GCD\{f_0, f_1, \dots, f_N\}$. GCD er *greatest common divisor function*. Bruk av denne metoden vil øke pulsevarigheten med faktor to i situasjoner der det ikke eksisterer NBI. Sannsynligheten for pulskollisjoner vil dermed økes og ytelsen senkes i forhold til et system som ikke anvender dublettpulser.



Figur 5.1: Bølgeform til dublettpuls med adskillelse $1ns$, basert på figur i [28]

5.2.2 Rake-mottaker

Ved bruk av en RAKE-mottaker kan man utnytte flerveisforplantningene til UWB signalet for å skape en mer sikker deteksjon. Det finnes flere ulike teknikker for å utnytte disse flerveisforplantningene. En av disse er *Maximum Ratio Combining* (MRC) der de ulike flerveiskomponentene vektlegges og summeres slik at signal-støy-forholdet maksimeres. Bruk av MRC er derimot kun optimal når støyen som påvirker signalet kommer fra additiv hvit Gaussisk støy (AWGN). I tilfeller der WPAN basert på UWB befinner seg i nærheten av WLAN vil det være gunstig å benytte andre metoder enn kun MRC [29]. *Optimum combining* (OC) Rake mottaker består av L korrelatorer etterfulgt av en lineær kombinerer. Det mottatte signalet blir i dette tilfellet vektet og kombinert slik at SINR maksimeres. *Minimum mean-square error* (MMSE) Rake mottaker en type av OC der vekting er optimert slik at man oppnår maksimal instantan SNR per puls. En slik mottaker kan benyttes til å undertrykke NBI ved at vektingen av de ulike komponentene velges slik at NBI dempes [30]. I praksis må korrelasjonsmatrisen til interferensen og støyen estimeres ut i fra treningssymboler slik at når estimasjonen påvirkes av målestøy vil ikke bruk av MMSE løsningen være helt optimal [29].

5.2.3 MRTW og AMRTW

I en RAKE-mottaker benyttes det som nevnt en mal på den mottatte bølgeformen ved korrelasjon. *Modified receiving template waveform* (MRTW) er en metode for å modifisere denne malen hos UWB mottakeren. I [31] benyttes denne metoden for å minske interferens. Antar at pulsformen som benyttes i UWB-IR systemet er en 1. ordens gaussisk puls som kan uttrykkes ved:

$$s(t) = \exp(-at^2/\tau^2)\sin(2\pi f_0 t) \quad (5.2)$$

der $a = \log_e 10$, $\tau = 0,5 \cdot 10^{-9}$ og $f_0 = 4,2 \cdot 10^9 \text{ Hz}$ som er senterfrekvensen til UWB-IR signalet. For å dempe interferens fra IEEE802.11a WLAN modifiseres denne pulsformen og brukes som mal hos mottakeren. $s(t)$ dekomponeres her til å bestå av summen til 11 sub-bærebølgepulser. $s(t)$ kan da uttrykkes som:

$$s(t) = \hat{s}(t) = \sum_{i=1}^{11} X_i \exp(-at^2/\tau^2)\sin(2\pi f_i t) \quad (5.3)$$

der $a = \log_e 10$, $\tau = 0,5 \cdot 10^{-8}$ og f_i er senterfrekvensen til i 'te sub-bærebølgepuls og $|f_{i+1} - f_i| = 200 \text{ MHz}$. Ytelsen til systemet med hensyn på bitfeilrate vil være likt som et system uten bruk av MRTW uten påvirkning av interfererende systemer, men vil gi en forbedring av denne ytelsen hvis interfererende systemer eksisterer.

Adaptive MRTW (AMRTW) er en utvidelse av MRTW som også tar hensyn til stokastiske og forskjellige NBI [32]. Denne metoden utvider MRTW metoden og legger til en adaptiv frekvensestimator, som estimerer senterfrekvensen og frekvensbåndet til de interfererende signalene, og en adaptiv kompositor for å danne bølgeform-malen. Parametrene som finnes ved bruk av den adaptive frekvensestimatoren benyttes som inndata i bølgeformkompositoren. Denne metoden dekomponerer altså korrelasjonsbølgeformen adaptivt og vil dermed kunne anvendes i situasjoner der man ikke har kjennskap til senterfrekvensen til det interfererende systemet.

5.2.4 Bruk av filter

Ikegame m.fl [31] foreslår bruk av et filter i mottakeren for å redusere virkningen av et interfererende 802.11a WLAN system. Filteret benyttes før korrelasjon i mottakeren og brukes til å dempe et interfererende signal ved en gitt frekvens. I tilfeller uten en interfererende 802.11a kilde vil bruk av denne metoden øke bitfeilraten.

5.2.5 Interferensbekjempelse i MAC

Metodene beskrevet hittil har tatt for seg NBI problemet på det fysiske laget. Det vil også være mulig å håndtere NBI i andre lag. I IEEE 802.11a benyttes *Distributet Coordination Function* (DCF) som aksessprotokoll. Denne protokollen er hovedsakelig basert på CSMA/CA, men DCF kan også benytte en utveksling av kontrollpakker for å minimere antall kollisjoner ytterligere. Det sendes da *Request to Send* (RTS) og *Clear to Send* (CTS) pakker mellom sender og mottaker slik at andre stasjoner i nærheten blir oppmerksomme på at det foregår en transmisjon og unngår å aksessere kanalen. Firozbaksh m.fl [25] foreslår å benytte disse kontrollpakkene i UWB systemet for å informere IEEE 802.11a stasjonene om at mediet vil være uttilgjengelig for et

5.2. HÅNTERING AV NBKAPITTEL 5. NÆRBÅNDSINTERFERENS

gitt tidsrom. I dette tidsrommet kan dermed UWB-nodene kommunisere fritt uten å bli påvirket av interferens fra IEEE802.11a.

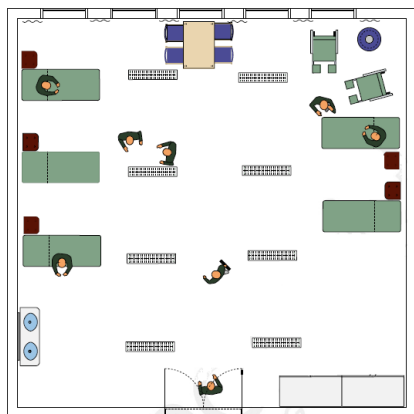
KAPITTEL 6

Simulering

Det er foretatt en simulering av MAC-protokollene UWB^2 og DCC-MAC. Det er her tatt for seg to forskjellige scenarioer. Scenario 1 beskriver et rom med pasienter med sensorer som måler ulike kroppsfunksjoner som for eksempel EKG og blodtrykk. Det vil her bli sett på hvordan pakkefeilraten til systemet påvirkes av antall noder som befinner seg i rommet. Nodeantallet er variert fra 5-45 noder og disse blir fordelt tilfeldig i et rom på 10 ganger 10 meter. Mottakernoden har alltid fast plassering midt i rommet. Dette scenarioet er illustrert i figur 6.1 og 6.2. Pakkefeilraten vil bli beregnet for hver simulering.

Det andre scenarioet tar for seg et overvåkningsrom eller operasjonsrom der to pasienter er utstyrt med 4 noder hver som overvåker kroppsfunksjoner slik som i scenario 1. Det er her tatt utgangspunkt i et rom på 5 ganger 5 meter. Mottakernoden har fast plassering på den ene veggen i rommet. Dette scenarioet er illustrert i figur 6.3 og 6.4. Pakkestørrelsen vil bli forandret og pakkefeilraten vil bli beregnet for hver simulering. Pakkestørrelsene ble satt til 48, 56, 64, 72, 80, 88, 96, 104, 112, 120 og 128 Byte.

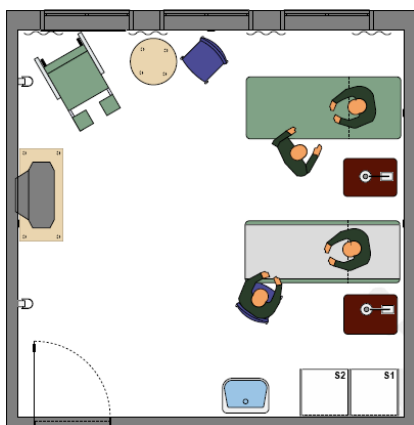
Det vil i begge scenarioene antatt at sensorene har en punktprøvningsfrekvens på $500Hz$ og 12 bit per punktprøve som gir en datarate på $R = 500 \cdot 12 =$



Figur 6.1: Plantegning for scenario 1



Figur 6.2: 3D-illustrasjon av scenario 1



Figur 6.3: Plantegning for scenario 2



Figur 6.4: 3D-illustrasjon av scenario 2

KAPITTEL 6. SIMULERING

6000bit/sek. Begge scenarioene tar bruk av en stjernestruktur der alle sensornodene sender til én mottakernode med fast plassering. Det vil for begge scenarioer bli utført simuleringer for både *Line of Sight* (LOS) og *non Line of Sight* (NLOS). Det er i simuleringene ikke tatt hensyn til andre interfererende systemer som kan operere i samme frekvensbånd.

Parametrene til det fysiske laget er satt i henhold til den kommende IEEE 802.15.4a standarden [20]. Det er benyttet en sendereffekt på 36,5uW og en transmisjonsrate på 1Mbit/s. En oversikt over faste parametrene som er satt i simuleringen er vist i tabell 6.1.

Det er i hvert simuleringsoppsett utført 3 simuleringer á 200 sekunder og resultatet er en midling av disse.

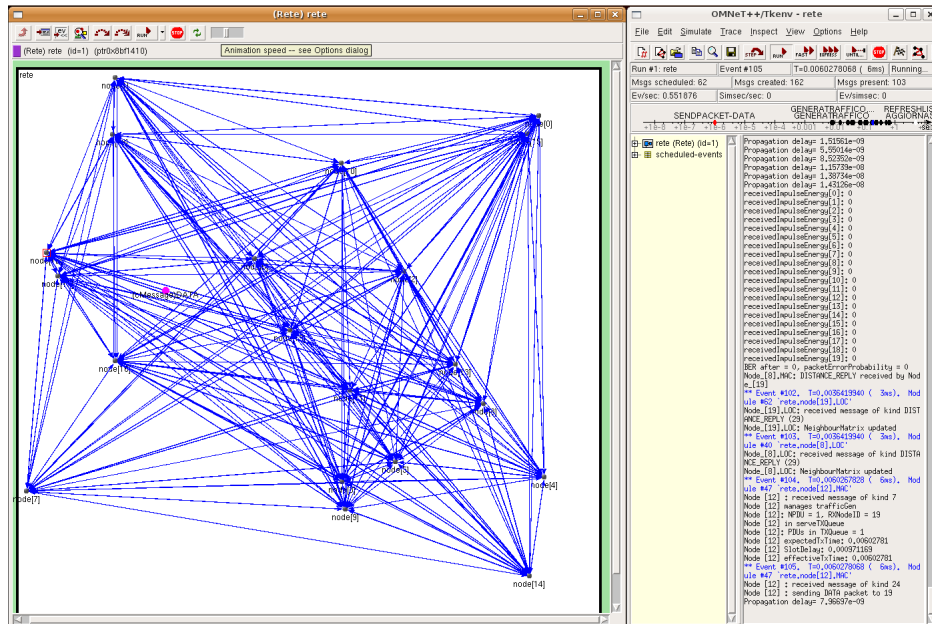
<i>Sendereffekt</i>	<i>Transmisjonsrate</i>	<i>Node bitrate</i>	<i>Synkroniseringsforord</i>
36,5uW	1Mbit/s	6000bit/s	64bit

Tabell 6.1: Simuleringsparametre

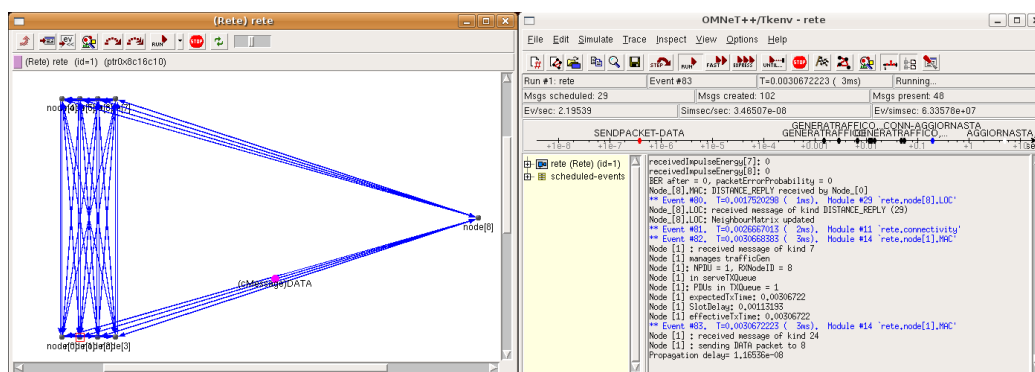
6.1 UWB^2

Simuleringen av $(UWB)^2$ ble foretatt i OMNeT++. OMNeT++ er en diskret hendelsessimulator basert på C++ som er designet spesielt for simulering av kommunikasjonsnettverk. Programmet er utviklet av András Varga [33]. En OMNeT++ modell består av moduler som kommuniserer ved avlevering av meldinger. En av fordelene med OMNeT++ er at man kan simulere ønsket nettverk via et grafisk brukergrensesnitt. Brukeren kan dermed for eksempel se animasjon av meldingsflyten gjennom nettverket.

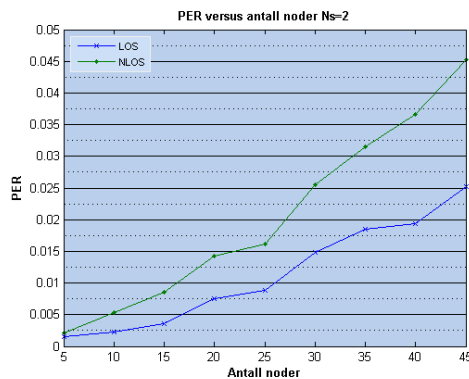
OMNeT++ støtter opprinnelig ikke simulering av MAC-protokollen $(UWB)^2$ for UWB-IR. Luca De Nardis og Maria-Gabriella di Benedetto har imidlertid utviklet en implementasjon i OMNeT++ som baserer seg på denne protokollen [34], men denne koden er ikke publisert enda. Installasjonsinstruksjon og bruk av koden er vedlagt i vedlegg C. Den forløpige utgaven av denne implementasjonen inneholder ikke noen form for feilrettende kode slik at hvis en bit er feil vil hele pakken gå tapt. Multibrukerinterferensen beregnes ut i fra pulskollisjonsmodellen beskrevet i [35]. Kanalmodellen som er implementert for UWB-IR er *UWB path loss characterization in residential environments* [36]. Denne forplantningsmodellen er beskrevet nærmere i vedlegg B. Figur 6.5 og 6.6 viser brukergrensesnittet i OMNeT++ ved bruk av $(UWB)^2$ for henholdsvis scenario 1 og 2. Linjene som er tegnet mellom alle nodene er kun mulige kommunikasjonslinjer og kun de mellom den faste mottakeren og de andre nodene benyttes.



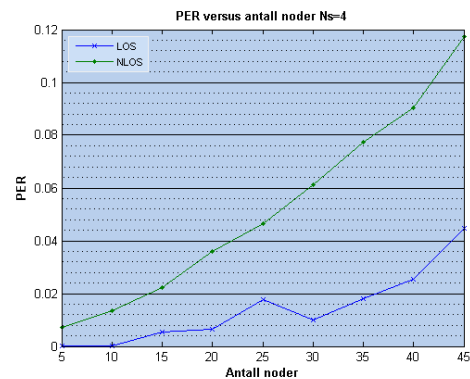
Figur 6.5: Brukergrensesnitt i OMNeT++ scenario1



Figur 6.6: Brukergrensesnitt i OMNeT++ scenario2



Figur 6.7: Pakkefeilrate versus antall noder, $N_s = 2$



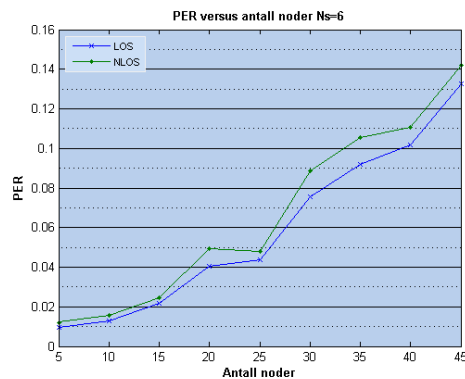
Figur 6.8: Pakkefeilrate versus antall noder, $N_s = 4$

6.1.1 Simulering av UWB^2

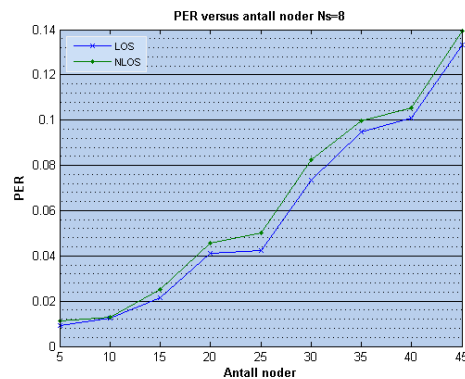
I simuleringen av $(UWB)^2$ ble antall pulser som sendes per bit, N_s , variert. De ulike verdiene for N_s ble satt til 2, 4, 6 og 8. Pulsintervallet, T_s , ble endret i samsvar med N_s slik at transmisjonsraten ble holdt konstant på 1Mbit/s .

Scenario1

Scenario 1 tok for seg et økende antall noder innenfor et begrenset geografisk område. Figur 6.7, 6.8, 6.9 og 6.10 viser pakkefeilraten for økende nodeantall ved bruk av forskjellige verdier for N_s . Resultatene av simuleringen viser at pakkefeilraten øker for økende antall noder. Dette er som forventet da flere noder innenfor samme område vil skape interferens for hverandre og pakke-transmisjoner vil kollidere. Det er også større sannsynlighet for pakketap ettersom antall pulser per bit økes. Hver bit blir da representert med flere pulser for å gi en bedre deteksjon. Grunnen til at PER øker er at flere pulser per bit øker sannsynligheten for pulskollisjon samtidig som pulsintervallet ble senket i takt med N_s for å holde raten konstant. Det vil si at pulsene fra ulike brukere fordeles innenfor et kortere tidsintervall noe som fører til at sannsynligheten øker for at to pulser fra to ulike sendere kolliderer.



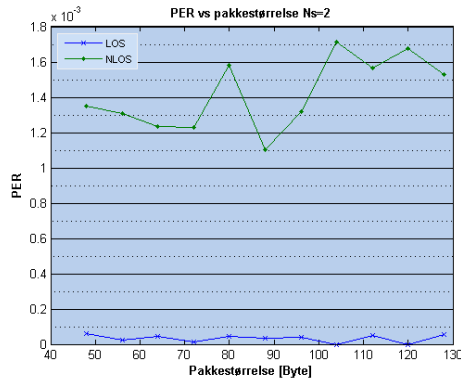
Figur 6.9: Pakkefeilrate versus antall noder, $N_s = 6$



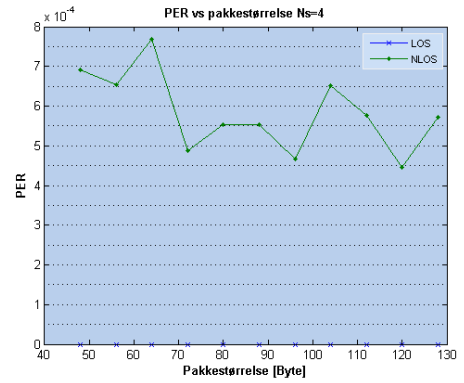
Figur 6.10: Pakkefeilrate versus antall noder, $N_s = 8$

Scenario 2

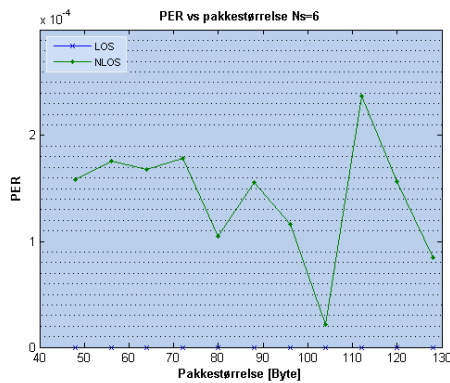
Scenario 2 omhandlet et fast antall noder der pakkestørrelsen ble forandret. I tillegg ble antall pulser per bit variert i likhet med scenario 1. Figur 6.11, 6.12, 6.13 og 6.14 viser resultatene for simuleringen av dette scenarioet. Resultatene viser at pakkefeilraten i tilfellet der senderene har fri sikt til mottakeren er tilnærmet null for alle pakkestørrelser og verdier av N_s . Det maksimale pakketapet ved LOS er ca $0,05 \cdot 10^{-3}$ for $N_s = 2$ og en pakkestørrelse på 48 Byte. Ved NLOS synker pakkefeilraten ved en økning av N_s . Grunnen til at pakkefeilraten her minker for økende N_s og ikke motsatt slik som for simuleringen av scenario 1 er at det i dette scenarioet kun befinner seg 8 noder som sender simultant. Selv om antall pulser som sendes per bit økes og pulsintervallet minkes vil allikevel sannsynligheten for kollisjon være lav. Dermed vil mottakeren kunne basere bitdeteksjonen på flere pulser og øke sannsynligheten for korrekt deteksjon. Resultatene viser også at PER i NLOS tilfellet har en tenderende økning for økende størrelse av pakkene som benyttes. Dette kan begrunnes i at det ikke benyttes noen feilrettende kode slik at kun én bitfeil vil gi pakketap. Ved bruk av store pakkestørrelser vil det dermed være større sannsynlighet for at en bit i pakken er korrumpert i forhold til mindre pakkestørrelser. Samtidig vil økningen av pakkestørrelse redusere transmisjonstiden og antall pulser som sendes fra hver node slik at virkningen av økende pakkestørrelser på PER ikke blir så stor som forventet.



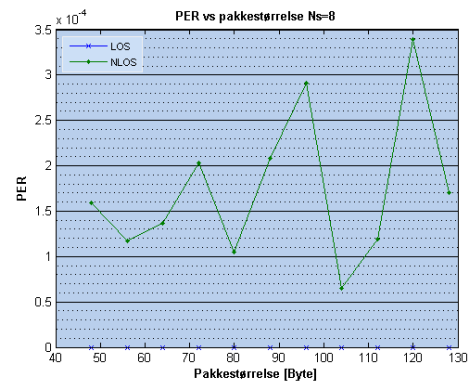
Figur 6.11: Pakkefeilrate versus pakkestørrelse, $N_s = 2$



Figur 6.12: Pakkefeilrate versus pakkestørrelse, $N_s = 4$



Figur 6.13: Pakkefeilrate versus pakkestørrelse, $N_s = 6$



Figur 6.14: Pakkefeilrate versus pakkestørrelse, $N_s = 8$

6.2 DCC-MAC

Simuleringen av DCC-MAC ble foretatt i *Network Simulator 2* (NS2) [37]. *Network Simulator* (NS) begynte som en variant av REAL network simulator i 1989. I 1995 ble utviklingen av NS videreført i samarbeid med DARPA gjennom et prosjekt kalt *Virtual InterNetwork Testbed* (VINT). NS2 er en diskret hendelsessimulator som er laget for forskning og testing innen nettverksoppbygging. NS2 er basert på to programmeringsspråk og består av en objektorientert simulator skrevet i C++ og OTcl for å utføre brukerens kommandoskript. Det er tatt i bruk to ulike programmeringsspråk fordi simulatoren har to ulike oppgaver å forholde seg til. På den ene siden krever en detaljert simulering av protokoller et programmeringsspråk som effektivt kan manipulere bytes, pakkeheaders og implementere algoritmer som tar i bruk store mengder data. For disse oppgavene er rask kjøretid viktig. På den andre siden må man ofte variere parametre og konfigurere nettverket ved forskjellige simuleringer, noe som krever et programmeringsspråk som er raskt omgjørbart. C++ er raskt å kjøre, men tar lengre tid å endre noe som gjør det egnet til detaljert protokollimplementering. OTcL kjører mye saktere, men kan endres veldig raskt og gjør det derfor svært egnet til konfigurasjon av simuleringen.

NS2 støtter ikke opprinnelig simulering av trådløse nettverk basert på UWB, men Ruben Merz m.fl [38] har laget en modifikasjon og utvidelse av NS2 slik at UWB støttes. Denne utvidelsen kalles *Ultra Wide-Band (UWB) MAC and PHY simulator* [39] og inneholder et MAC lag, DCC-MAC, og en modell av et fysisk lag basert på UWB impulsradio. Utvidelsen inneholder i tillegg en ny forplantingsmodell for UWB, *UWB path loss characterization in residential environments* [36] i likhet med implementasjonen av (UWB)² i OMNeT++.

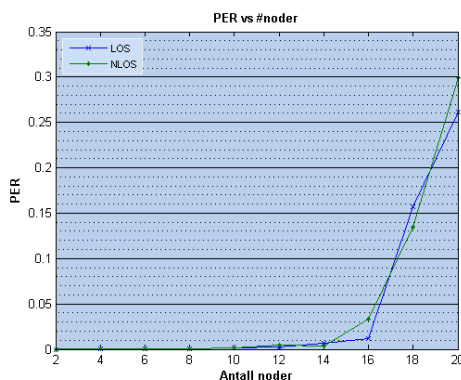
Det fysiske laget for UWB i NS2 er basert på TH og BPSK og en RCPC kanalkoder. For hver mottatte pakke beregnes signal-til-interferens og støyforholdet (SINR) ut i fra mottatt effekt og kumulativ interferens fra andre noder. Bitfeilraten finnes for den gitte SINR verdien ut i fra tabeller som beregnes på forhånd for en gitt kombinasjon av modulasjon, kanalkoding, multibrukerstatistikk og mottakerimplmentasjon. Pakkefeilraten beregnes ved $PER = 1 - (1 - BER)^L$, der L er lengden på payload.

6.2.1 Simulering av DCC-MAC

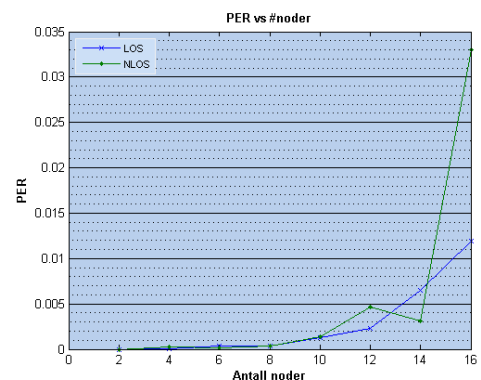
DCC-MAC har ingen definert pakkestruktur og det vil i simuleringen derfor bli antatt at pakkene er bygd opp på samme måte som for $(UWB)^2$.

Scenario 1

Figur 6.15 viser pakkefeilraten for økende antall noder. Man ser av figuren at pakketapet blir svært høyt når antallet noder i nettverket går mot 20. Dette kommer av at ved implementasjonen i NS2 kan mottakernoden kun motta en pakke av gangen. Når antall pakker som sendes til denne mottakeren blir svært høyt vil derfor noden i simuleringsprogrammet ikke ha mulighet til å motta alle disse og de vil bli antatt tapt av senderene. Figur 6.16 viser pakketapet for opp til 16 noder. Pakketapet er her svært likt for LOS og NLOS opp til 10 noder noe som er naturlig da DCC-MAC vil tilpasse kanalkoden etter kanalforholdene. Dermed vil pakkefeilraten bli mindre men hver node vil sende over en større tidsperiode noe som øker interferensen og minker levetiden til nodene. Ved 14 noder er PER lavere for NLOS enn ved LOS. Grunnen til dette kan være statistiske avvik i simuleringen slik at NLOS kan ha kommet svært godt ut med tanke på plassering av nodene i forhold til mottakeren ved alle 3 simuleringene.



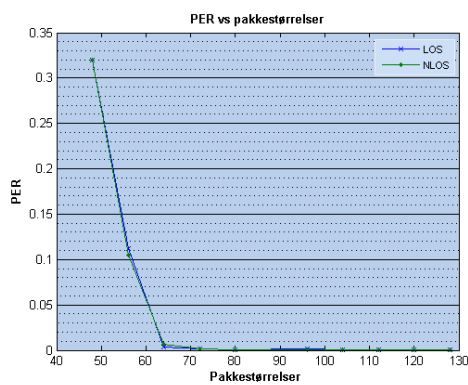
Figur 6.15: Pakkefeilrate versus antall noder



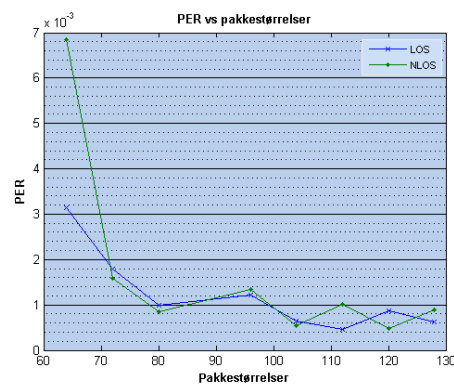
Figur 6.16: Pakkefeilrate versus antall noder

Scenario 2

Figur 6.17 viser pakkefeilraten for forskjellige pakkestørrelser. Også her setter implementeringen i NS2 begrensninger i likhet med for scenario 1 da pakketapet blir svært høyt for små pakkestørrelser der antall pakker i nettverket er svært høyt. Figur 6.18 viser pakkefeilraten med pakkestørrelser variert fra 64 til 128 Byte. DCC-MAC gir også her like resultater mellom LOS og NLOS tilfellet.



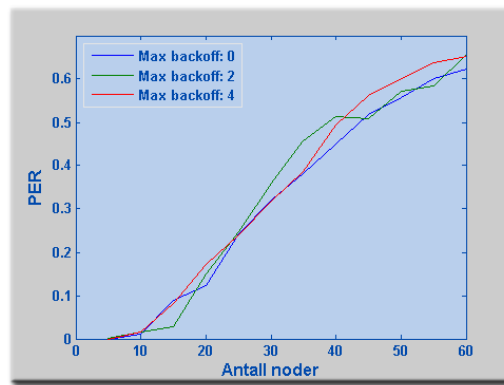
Figur 6.17: Pakkefeilrate versus pakkestørrelse



Figur 6.18: Pakkefeilrate versus pakkestørrelse

6.2.2 Zigbee

Figur 6.19 viser pakkefeilraten for Zigbee ved økende antall noder [40]. Denne vil bli brukt senere i diskusjonen.



Figur 6.19: Zigbee: PER versus antall noder, hentet fra [40]

6.3 Energiforbruk

I biomedisinske sensor nettverk er det et svært strengt krav til energiforbruk. Nodene skal ofte implementeres i kroppen til pasienter og det er derfor ønskelig at disse ikke må byttes ut med jevne mellomrom. Det vil i dette kapitlet bli foretatt en sammenligning mellom eksisterende standard Zigbee og UWB-IR basert på de to ulike MAC-lagene presentert tidligere.

I beregningen av energiforbruket er det tatt for seg et enkelt scenario med en sender- og mottakernode 3 meter unna hverandre. Det er ikke tatt hensyn til andre interfererende systemer og det er antatt at det er fri sikt mellom sender og mottaker slik at kanalforholdene kan betegnes som gode. Bitraten fra kilden er antatt å være på 6000bit/s .

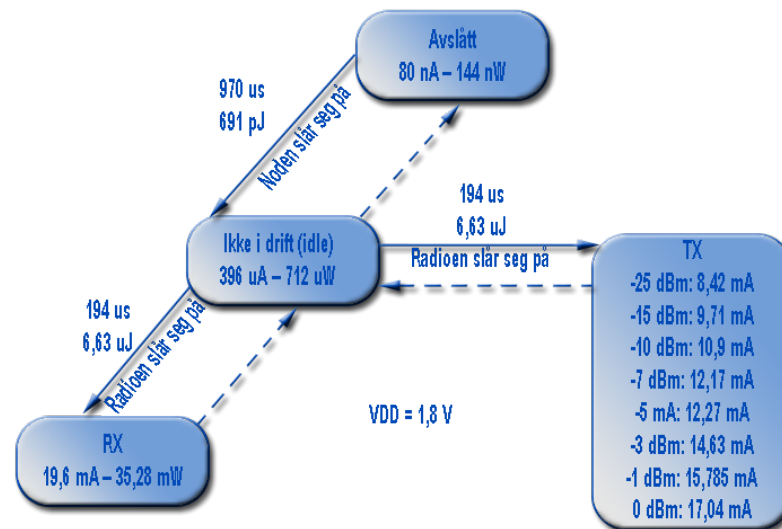
6.3.1 Zigbee

For å beregne effektforbruket er det tatt utgangspunkt i Chipscon's chip CC2420 [41]. Hver datapakke inneholder en payload, header og footer. De to sistnevnte har en fast størrelse på henholdsvis 23 og 2 Byte. For å kunne beregne det totale effektforbruket i en node må man ta hensyn til forbruket den har i de ulike tilstandene. CC2420 kan operere i fire ulike tilstander:

- Avslått
- Ikke i drift (*Idle*)
- Sende (TX)
- Motta (RX)

I sensornettverk der man har lav arbeidssyklus vil forbruket når noden går fra en tilstand til en annen ha stor påvirkning på det totale effektforbruket [42]. Bougard m.fl har utført målinger med CC2420. Resultatet av disse målingene er vist i figur 6.20. Transisjonsenergien er her beregnet ved å multiplisere transisjonstiden med effektforbruket i ankomsttilstanden. Disse resultatene vil blir brukt videre i beregningen av energiforbruket.

For å beregne effektforbruket i vårt tilfelle er det antatt noden sender en pakke i løpet av en superramme. Superrammen er antatt å ha en varighet

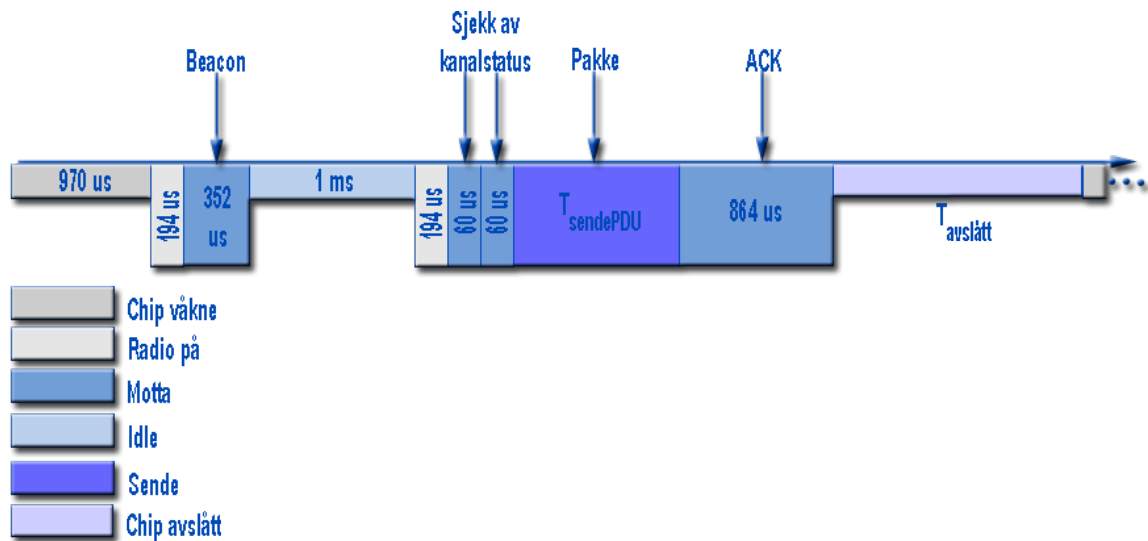


Figur 6.20: CC2420 effekt og energiforbruk, basert på figur fra [42]

på 15 ms noe som vil si at hvert sekund er delt opp i ca. 66 superrammer. Noden må sende et variabelt antall pakker per sekund ut i fra den valgte pakkestørrelsen for å møte kravet på en rate på 6000 bit/s fra sensoren. For å sende en pakke må noden våkne opp periodisk og lytte etter en nettverks-beacon og deretter forsøke å sende pakken sin. Beaconstørrelsen er antatt å være på 11 byte og noden må sjekke kanalen to ganger før den sender i CAP delen av superrammen [1]. Kanalen er antatt alltid å være ledig når noden sjekker statusen. En bekreftelsesramme ankommer senderen etter minimum 194 us og senderen venter maksimum 864us på bekreftelsespakken [42]. På grunn av at noden bruker 194us på å skru på radioen går noden ikke i idlemodus mens den venter på bekreftelsespakken. Antar i dette tilfellet at bekreftelsesrammen alltid ankommer i det gitte tidsrommet slik at det aldri er nødvendig med retransmisjon av pakken. Etter å ha sendt pakken kan noden sove den resterende av superrammen. Aktivitetsforløpet til en node som skal sende i en superramme er vist i figur 6.21.

Det totale energiforbruket for å sende 1 pakke blir da:

$$E_{pakke} = E_{vaakne} + 2 \cdot E_{radioOn} + E_{motta|beacon} + E_{idle} + 2 \cdot E_{sjekkKanal} + E_{sendePDU} + E_{mottaACK} + E_{sove} \quad (6.1)$$



Figur 6.21: Aktivitetsforløp i en superramme

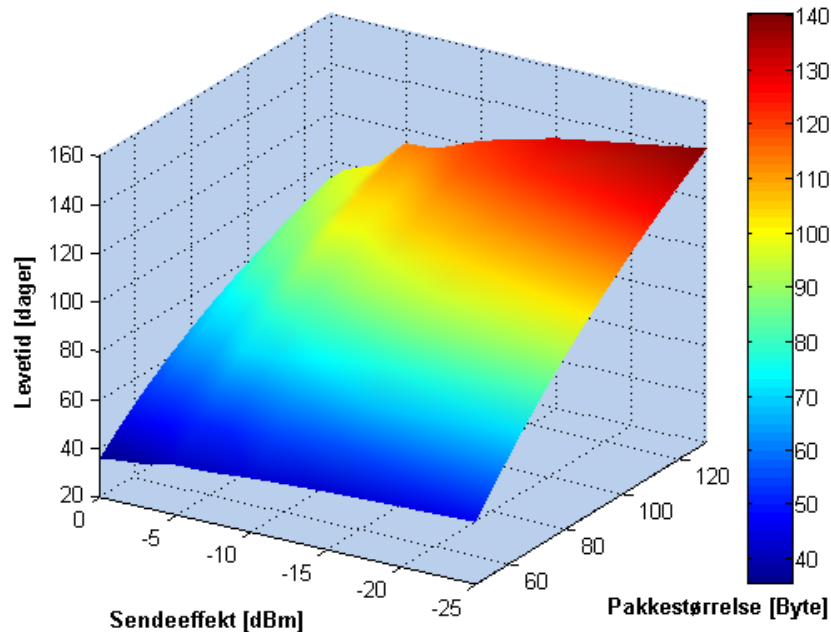
Noden må sende gitt antall pakker i løpet et sekund, p , og kan dermed sove den resterende tiden. Det totale energiforbruket per sekund er da gitt ved:

$$E_{\text{sekund}} = E_{\text{pakke}} \cdot p + E_{\text{avslått}} \cdot (1s - p \cdot 15ms) \quad (6.2)$$

Hvis man antar at noden er drevet av et batteri på 3V med 1000mAh som for eksempel Panasonic CR2477-1HF [43] vil levetiden til noden være gitt ved:

$$T_{\text{levetid}|_{-XdBm}} = \frac{3V \cdot 1000mAh \cdot 3600s/h}{E_{\text{sekund}}} \cdot \frac{1}{3600 \cdot 24} \quad (6.3)$$

Figur 6.22 viser levetiden til en node i forhold til pakkestørrelse og sender-effekt. Man ser av denne figuren at nodens levetid forlenges ved økende pakkestørrelser og minkende sendereffekt. Grunnen til dette er at man ved større pakkestørrelser har en større andel databit per pakke slik at noden totalt sett sender færre kontrollbit per sekund. Valg av lave sendereffekter gir selvfølgelig et lavere effektforbruk i noden, men samtidig blir rekkevidden til noden mindre slik at den optimale sendereffekten må bestemmes ut i fra scenarioet noden befinner seg i.



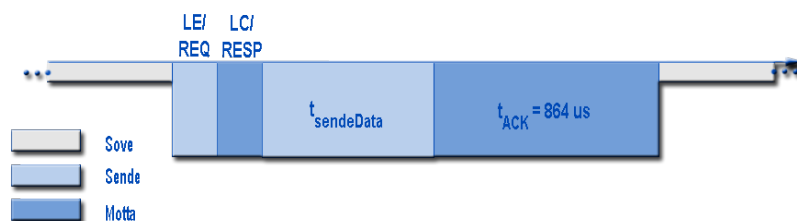
Figur 6.22: Nodens levetid i forhold til sendereffekt og pakkestørrelse

6.3.2 UWB-IR

I beregningene av energiforbruket for UWB-IR er det antatt at begge MAC-protokollene benytter en 90nm digital CMOS digital UWB sender fra IMEC [44]. Dette er en sender laget for den kommende IEEE 802.15.4a standarden. Energiforbruket til denne senderen er på 40pJ per puls ved en senterfrekvens på $3,5\text{GHz}$ som tilsvarer $0,65\text{mW}$ for en datarate på 1Mbit/s . Det antas videre at det anvendes en $0,18\mu\text{m}$ CMOS UWB mottaker utviklet av IMEC [45] med et strømforbruk på 16mA ved $1,8\text{V}$.

Det vil i beregningen av energiforbruket være store likhetstrekk mellom $(UWB)^2$ og DCC-MAC. DCC-MAC har ingen definert pakkestruktur som nevnt tidligere og det må derfor antas at strukturen er lik som for $(UWB)^2$, det vil si som beskrevet i [20]. Pakkene har en liknende oppbygning som i IEEE 802.15.4 og består av en header på 24 byte, en variabel payload på maksimalt 103 byte og en trailer på 2 byte. $(UWB)^2$ benytter seg av *Reed Solomon* (RS) (51,43) *Forward Error Correction* (FEC) kode i samsvar med det fysiske laget i den fremtidige IEEE 802.15.4a standarden. DCC-MAC benytter seg av en variabel rate kanalkoder, RCPC. Energiforbruket til protokollene med hen-

syn på kanalkoding vil derfor være forskjellig, men dette forbruket vil være neglisjerbart noe som vises senere. Det antas også at det legges et synkroniseringsforord på 64 bit til hver datapakke.



Figur 6.23: Hendelsesforløp for pakkeoverføring UWB

I $(UWB)^2$ og DCC-MAC foretas en utveksling av kontrollpakker, LE/REQ og LC/RESP, før transmisjon av datapakken. Det er i denne beregningen antatt at disse pakkene ikke kodes. LE og LC pakkene i $(UWB)^2$ har 0 byte i payload og blir da på 26 byte hver [20]. REQ og RESP i DCC-MAC antas være identiske med henholdsvis LE og LC. I tillegg antas det at LE/REQ pakken må inneholde en synkroniseringstrailer på 64 bit slik at total størrelse blir på 34 byte. Dette gir hendelsesforløpet for hver pakkeoverføring vist i figur 6.23. Bekreftelsespakken som mottas har en størrelse på 28 byte [20] og det er antatt at noden venter på denne i maksimalt $864\mu s$ slik som i IEEE 802.15.4. Det er videre antatt at bekræftelsesrammen alltid ankommer i dette tidsrommet slik at det ikke er nødvendig med retransmisjon av pakken. Mottakeren forbruker $16mA$ ved $1,8V$ som gir et effektforbruk på $P_{mottaker} = 28,8mW$. Forbruket av energi som følge av å motta en bekræftelsespakke og LC/RESP og sende LE/REQ blir da:

$$E_{LE/RESP} = (34 \cdot 8 \cdot N_s) \cdot E_{puls}$$

$$E_{LC/REQ} = P_{mottaker} \cdot \tau_{LC/REQ} = 28,8mW \cdot 208\mu s = 5,99\mu J$$

$$E_{ACK} = P_{mottaker} \cdot \tau_{ACK} = 28,8mW \cdot 864\mu s = 24,88\mu J$$

Energiforbruket for transmisjon av datapakken vil være avhengig av kanalkoden som anvendes og hvor mange pulser som sendes per bit. Transmisjonsraten holdes konstant $1Mbit/s$ slik at en endring i N_s også gir en endring i pulsintervallet. For $(UWB)^2$ benyttes som nevnt tidligere en RS (51,43)

FEC og energiberegningen vil bli gjort for ulike verdier av N_s . For DCC-MAC antas det at protokollen har mulighet til å benytte 3 ulike koderater på henholdsvis $\frac{8}{11}$, $\frac{1}{2}$ og $\frac{1}{3}$ slik som ved implementasjonen i NS2 [38] og det sendes 1 puls per kodete bit. Energiberegningen vil her bli gjort ut i fra ulike koderater der det antas at noden ikke endrer koderaten underveis. Energiforbruket for transmisjon av en datapakke med størrelse $s_{PDU|bit}$ er da gitt ved:

$$E_{data|uwb2} = s_{PDU|bit} \cdot \frac{51}{43} \cdot N_{s_{uwb2}} \cdot E_{puls} \quad (6.4)$$

$$E_{data|DCC} = s_{PDU|bit} \cdot koderate^{-1} \cdot E_{puls} \quad (6.5)$$

Energien som forbrukes for å generere et kodeord ved bruk av RS koding er gitt ved [46]:

$$E_{RS,enc} = 2t(N - 2t)(E_{mult} + E_{add}) \quad (6.6)$$

der energimodellen for addisjon og multiplikasjonsblokker over *Galois Field* ($GF(2^m)$) er gitt ved:

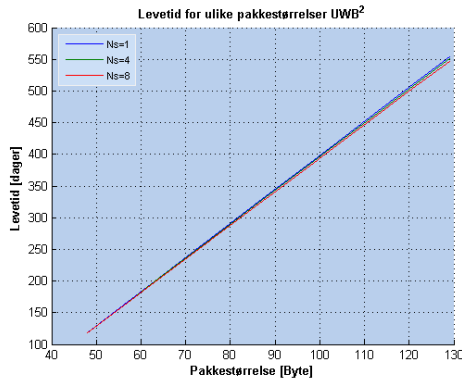
$$E_{add} = 3,3 \cdot 10^{-5} m(mW/MHz) \quad (6.7)$$

$$E_{mult} = 3,7 \cdot 10^{-5} m^3(mW/MHz) \quad (6.8)$$

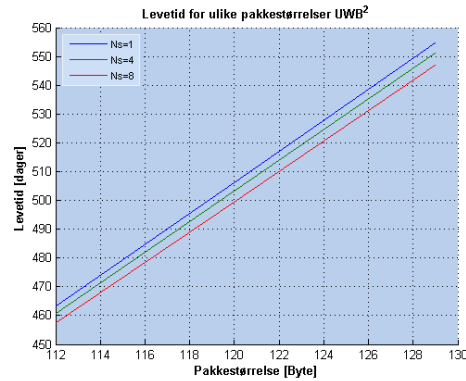
I likningene over er N lengden av hvert kodeord i bytes, t er antall feil som koderen kan rette og m er antall bit per informasjonssymbol. I denne sammenhengen anvendes det som nevnt tidligere en RS (51,43) kanalkoder slik at $N = 51$, $t = 4$ og m vil variere som følge av pakkestørrelsen. En pakkestørrelse på 129 byte gir $m = 24$. Videre er energiforbruket ved multiplikasjon og addisjon gitt ved klokkefrekvensen til koderen som anvendes. Det er derfor antatt at det benyttes en RSencoder fra Amphion [47] med en klokkefrekvens på $51MHz$. Det totale energiforbruket for å kode en datapakke på 129 byte blir da:

$$E_{RS,enc} = 192,62mW/MHz = 3,78nJ$$

Dette forbruket kan anses å være neglisjerbart i forhold til andre hendelser som følger av transmisjon av en datapakke der for eksempel mottak av ACK gir et forbruk på $24,88uJ$. Energiforbruket som følger av koding med RCPC



Figur 6.24: Levetid $(UWB)^2$ i forhold til ulike pakkestørrelser og N_s



Figur 6.25: Levetid $(UWB)^2$ i forhold til ulike pakkestørrelser og N_s

antas også å være neglisjerbart [48].

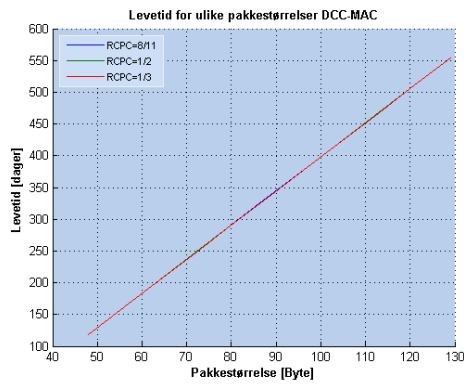
Noden kan sove den tiden den ikke sender datapakker eller mottar kontrollpakker. Forbruket i denne modusen er antatt å være på $144nW$ slik som for CC2420. Tiden det tar å sende én pakke er gitt i likning 6.9. Den totale sovetiden til noden per sekund blir da $t_{sove} = 1 - p \cdot t_{pakke}$, der p er antall pakker noden må sende per sekund for å overholde transmisjonskravet fra sensoren.

$$t_{pakke} = t_{LE/REQ} + t_{LC/RESP} + t_{sendePakke} + t_{ACK} \quad (6.9)$$

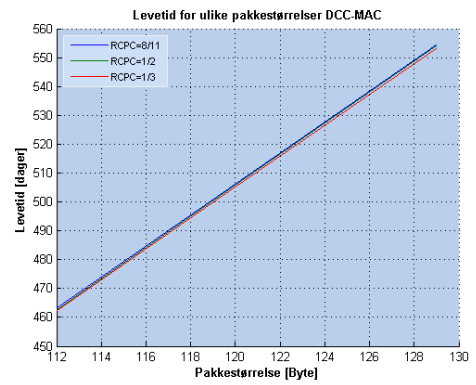
Det totale energiforbruket per sekund vil dermed være gitt ved:

$$E_{UWB-IR} = p \cdot (E_{LE/REQ} + E_{LC/RESP} + E_{sendeData} + E_{ACK}) + E_{sove} \quad (6.10)$$

Figur 6.24 og 6.25 viser levetiden til en node ved bruk av $(UWB)^2$ og figur 6.26 og 6.27 viser levetiden til en node ved bruk av DCC-MAC. De sistnevnte figurene i hvert tilfelle viser forstørrede utgaver for å tydeliggjøre forskjellen mellom bruk av ulik N_s og RCPC koderate.



Figur 6.26: Levetid DCC-MAC i forhold til ulike pakkestørrelser og RCPC koderater



Figur 6.27: Levetid DCC-MAC i forhold til ulike pakkestørrelser og RCPC koderater

KAPITTEL 7

Diskusjon og konklusjon

Dette kapittelet trekker frem observasjoner og mulige løsninger som er funnet ved den teoretiske beskrivelsen av MAC lag for UWB-IR og fra resultater av simuleringen.

UWB-IR er en teknologi som gir mange nye muligheter og utfordringer ved konstruksjon av en optimal stakk. Utfordringene vil bestå av håndtering av den lange synkroniseringstiden, begrensninger som følge av restriksjonene satt av FCC og best mulig utnyttelse av båndbredden. Hvilke teknikker og mekanismer som skal implementeres i MAC protokollen for at den skal være best egnet i biomedisinske nettverk vil være avhengig av mange ulike faktorer, blant annet hvilke type nettverksstruktur som skal benyttes og hvilke andre kommunikasjonssystemer den skal sameksistere med. Det vil være mulig å implementere UWB-IR i eksisterende standard IEEE 802.15.4/Zigbee. Dette vil derimot ikke være optimalt uten at man gjør endringer, slik at de unike egenskapene til UWB-IR signalet utnyttes. Protokollen for kanaltilgang, CS-MA/CA, i Zigbee må enten modifiseres eller byttes ut med en annen protokoll. Det må også gjøres endringer med tanke på RTS/CTS mekanismen i Zigbee, da denne vil senke ytelsen ved bruk i UWB-IR nettverk på grunn av synkroniseringsproblemet. I tillegg vil det være hensiktsmessig å implementere nye teknikker og funksjonaliteter som for eksempel posisjonering for å øke ytelsen til systemet ved at denne informasjonen kan utnyttes til blant

annet effektkontroll. Stakken til et fysisk lag basert på UWB-IR bør derfor krysslagsoptimeres, slik at denne informasjonen også kan utveksles mellom lagene. Dette kan da utnyttes til for eksempel rate og effektkontroll fra MAC laget samt posisjonering, avstandsmåling og ruting.

En sammenligning av ytelsen til de to protokollene i scenario 1 viser at DCC-MAC gir en lavere pakkefeilrate opp til 14 noder. Ved 12 noder gir DCC-MAC en $PER = 2 \cdot 10^{-3}$ ved LOS mens det ved bruk av $(UWB)^2$ og 2 pulser per bit vil være noe høyere. Ved NLOS vil også DCC-MAC komme bedre ut ved 12 noder med $PER = 5 \cdot 10^{-3}$ i forhold til $6 \cdot 10^{-3}$ for $(UWB)^2$. Det kan derfor virke som om DCC-MAC vil håndtere den økende interferensen bedre etterhvert som nodeantallet øker, men på grunn av den mangelfulle simuleringen i NS2 er det vanskelig å si noe konkret om hvordan utfallet ved større nodeantall vil være. I scenario 2 vil DCC-MAC gi en lavere pakkefeilrate ved NLOS, mens $(UWB)^2$ gir lavere PER ved LOS. Det er heller ikke fullt så stor forskjell i pakkefeilraten mellom LOS og NLOS ved bruk av DCC-MAC, noe som tyder på at den adaptive kanalkoderen håndterer de dårlige kanalforholdene ved NLOS bedre enn $(UWB)^2$. Medisinske scenarioer vil ofte variere mellom LOS og NLOS da det vil befinne seg andre personer i rommet, samt at pasienter har muligheten til å bevege seg i miljøet. En protokoll som håndterer NLOS og gir robust overføring vil derfor være svært viktig. Figur 6.19 [40] viser pakkefeilraten i forhold til antall noder for Zigbee. Både DCC-MAC og $(UWB)^2$ gir et lavere pakketap ved økende antall noder. Simuleringen av Zigbee der pakkestørrelser forandres er utført i et annerledes scenario enn scenario 2 beskrevet i denne oppgaven, slik at en sammenligning av resultatene mot simuleringen av UWB-IR ikke vil være hensiktsmessig. Ut i fra resultatene i simuleringene er det ikke entydig hvilken av MAC protokollene DCC-MAC og $(UWB)^2$ som er best egnet i et biomedisinsk sensornettverk. Begge protokollene gir derimot et lavere pakketap og kan samtidig tilby en høyere overføringsrate enn ved bruk av Zigbee.

Beregningen av energiforbruket for Zigbee og UWB-IR viser at bruk av UWB-IR vil øke levetiden til nodene i nettverket betraktelig. Zigbee-noder har en maksimal levetid på 140,1 dager ved bruk av største pakkestørrelse og minste sendereffekt. Grunnen til at størst mulig pakkestørrelse gir lengst levetid er at antallet nyttige databit i forhold til totalt antall transmitterte bit økes. Dette fører til at noden må ha senderen aktiv over et kortere tidsrom og dermed kan sove en større del av tiden. Ved bruk av UWB-IR vil det være mulig å øke levetiden til nodene til 554,5 dager som er den maksimale levetiden til hver av protokollene. Beregningene viser også at valg av antall pulser

som transmitteres per bit og hvilken koderate som benyttes i kanalkoderen for UWB-IR ikke har stor innvirkning på den totale levetiden til nodene. Dette har sin forklaring i at energien per utsendte puls er svært lav i forhold til energien som forbrukes ved at noden mottar pakker. En mulighet for å øke levetiden ytterligere kan derfor være å senke bruken av kontrollpakker ytterligere. Dette kan gjøres ved å for eksempel benytte en ACK-mekanisme der noden ikke må motta bekreftelsespakke for hver utsendte datapakke, men istedet mottar en samlet ACK for et gitt antall utsendte datapakker. Dette vil imidlertid senke påliteligheten til systemet og innføre forsinkelser dersom pakker må retransmitteres. Siden mesteparten av effektforbruket i UWB-IR noden er i mottakerdelen, vil utvikling av nye mottakere som har enda lavere effektforbruk være svært viktig i forhold til å øke levetiden til nodene ytterligere. Det er viktig å presisere at energibergeningene for UWB-IR ikke vil være helt korrekte da det ikke er tatt med transisjonsforbruk mellom de ulike tilstandene slik som for Zigbee, samt at energiforbruk i de øvre lagene av stakken er utelatt. Det er derfor forventet at reelle levetiden vil være noe lavere enn beregnet.

Bibliografi

- [1] IEEE Standards. Ieee 802.15.4-2003 mac and phy specifications for Ir-wpans. *The Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2003.
- [2] Zigbee Alliance. Zigbee specification. 2005.
- [3] Ashima Gupta and Prasant Mohapatra. A survey on ultra wide band medium access control schemes. *Comput. Networks*, 51(11):2976–2993, 2007.
- [4] Maria-Gabriella Di Benedetto and Guerino Giancola. *Understanding Ultra Wide Band Radio Fundamentals*. Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series, 2004.
- [5] Xuemin Shen, Weihua Zhuang, Hai Jiang, and Jun Cai. Medium access control in ultra-wideband wireless networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54(5):1663 – 77, Sept. 2005.
- [6] Jin Ding, Li Zhao, S.R. Medidi, and K.M. Sivalingam. Mac protocols for ultra-wide-band (uwb) wireless networks: impact of channel acquisition time. *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 4869:97 – 106, 2002//.
- [7] Rafael Kolic. An introduction to ultra wideband (uwb) wireless. *www.deviceforge.com*, 2004.
- [8] IEEE 802.15 Working Group for WPANs. Ieee 802.15 wireless personal area networks. 7 Mars 2006.

-
- [9] R. Merz et al. A joint phy/mac architecture for lowradiated power th-uw b wireless ad-hoc networks. *Wireless Commun. and Mobile Comp. J., Special Issue on Ultrawideband Communications*.
- [10] Young-Bae Ko and Nitin H. Vaidya. Location-aided routing (lar) in mobile ad hoc networks.
- [11] Ruben Merz Alaeddine El Fawal, Jean-Yves Le Boudec and Bovzidar Radunovic. Trade-off analysis of phy-aware mac in low-rate low-power uw b networks. *IEEE Communications Magazine*, December:147–155, 2005.
- [12] J.-Y. Le Boudec, R. Merz, B. Radunovic, and J. Widmer. Dcc-mac: a decentralized mac protocol for 802.15.4a-like uw b mobile ad-hoc networks based on dynamic channel coding. *Proceedings. First International Conference on Broadband Networks*, pages 396 – 405, 2004.
- [13] B. Radunovic and J. Y. Le Boudec. Optimal power control, scheduling and routing in uw b networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004.
- [14] Nathaniel J. August, Hyung-Jin Lee, and Dong Sam Ha. Pulse sense: A method to detect a busy medium in pulse-based ultra wideband (uw b) networks. *2004 International Workshop on Ultra Wideband Systems; Joint with Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies, Joint UWBST and IWUWBS 2004*, pages 366 – 370, 2004.
- [15] N.J. August and Dong Sam Ha. An efficient uw b radio architecture for busy signal mac protocols. *2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (IEEE Cat. No. 04EX957)*, pages 325 – 34, 2004.
- [16] Hanbing Shen, Weihua Zhang, Xizhi An, Seok ho Kim, Wei Liu, and Kyung sup Kwak. A new multiple access protocol for time-hopping uw b ad-hoc wireless networks. *International Symposium on Communications and Information Technologies 2005 (IEEE Cat. No.05EX1224)*, pages 842 – 5, 2005.
- [17] Luca De Nardis and Maria gabriella Di Benedetto. Medium access control design for uw b communication systems: review and trends. *KICS Journal of Communications and Networks*, 5:386 – 393, 2003.
- [18] Nishant Kumar, Swaroop Venkatesh, and R. Michael Buehrer. A spread-spectrum mac protocol for impulse-radio networks. *Vehicular Technology Conference, 2005. VTC-2005-Fall. 2005 IEEE 62nd*, 2005.

- [19] Luca De Nardis and Gian Mario Maggio. Low bit rate uwb networks. *Ultra Wideband Wireless Communication*, pages 315 – 339, 2006.
- [20] Maria-Gabriella Di Benedetto, Luca De Nardis, Guerino Giancola, and Daniele Domenicali. The aloha access (uwb)2 protocol revisited for ieee 802.15.4a. 2005.
- [21] M.-G. Di Benedetto, L. De Nardis, M. Junk, and G. Giancola. (uwb)²: uncoordinated, wireless, baseborn medium access for uwb communication networks. *Mobile Networks and Applications*, 10(5):663 – 74, 2005/10/.
- [22] Xiaoli Chu and Ross D. Murch. The effect of nbi on uwb time-hopping systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 3(5):1431 – 1436, 2004.
- [23] M.E. Sahin and H. Arslan. A narrowband interference identification approach for uwb systems. *MILCOM 2005. 2006 IEEE Military Communications Conference (IEEE Cat. No. 05CH37719)*, Vol. 3:1404 – 8, 2005.
- [24] B. Firoozbakhsh, T.G. Pratt, and N. Jayant. Analysis of ieee 802.11a interference on uwb systems. *2003 IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies (IEEE Cat. No.03EX759)*, pages 473 – 7, 2003//.
- [25] Babak Firoozbakhsh, Nikil Jayant, and Lakshmi Chakrapani. Mac layer mitigation of interference between ieee 802.11a and ultra wideband (uwb) systems.
- [26] A. Taha and K.M. Chugg. A theoretical study on the effects of interference uwb multiple access impulse radio. *Conference Record of the Thirty-Sixth Conference on Signals, Systems and Computers (Cat. No.02CH37387)*, vol.1:728 – 32, 2002//.
- [27] Andrea Giorgetti, Marco Chiani, and Moe Z. Win. Ultrawide bandwidth rake reception in the presence of narrowband interference. *IEEE Vehicular Technology Conference*, 59(3):1659 – 1663, 2004.
- [28] Hassan Khani and Paeiz Azmi. Performance analysis of th-uwb radio systems using proper waveform design in the presence of narrow-band interference. *European Transactions on Telecommunications*, 17(1):111 – 123, 2006.
- [29] Honsan Sheng, A.M. Haimovich, A.F. Molisch, and Jinyun Zhang. Optimum combining for time hopping impulse radio uwb rake receivers. *2003*

- IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies (IEEE Cat. No.03EX759)*, pages 224 – 8, 2003//.
- [30] Itsik Bergel, Eran Fishler, and Hagit Messer. Narrowband interference mitigation in impulse radio. *IEEE Transactions on Communications*, 53(8):1278 – 1282, 2005.
- [31] T. Ikegami and K. Ohno. Interference mitigation study for uwb impulse radio. *14th IEEE 2003 International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Proceedings (IEEE Cat. No.03TH8677)*, Vol.1:583 – 7, 2003//.
- [32] Lei Jiang, Yongsheng Wang, and Jianxin Guo. A novel approach to interference mitigation for uwb pulse radio. *Proceedings - 2005 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WCNM 2005*, 1:337 – 340, 2005.
- [33] Omnet++ community site. <http://www.omnetpp.org/>.
- [34] Luca De Nardis. Luca de nardis [lucadn@newyork.ing.uniroma1.it]. 2007.
- [35] Guerino Giancola and Maria-Gabriella Di Benedetto. A novel approach for estimating multi-user interference in impulse radio uwb networks: The pulse collision model. 2005.
- [36] S.S. Ghassemzadeh and V. Tarokh. Uwb path loss characterization in residential environments. *2003 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium. Digest of Papers (Cat. No.03CH37410)*, pages 501 – 4, 2003//.
- [37] The network simulator - ns2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [38] Jean-Yves Le Boudec, Ruben Merz, Bozidar Radunovic, and Jörg Widmer. An architecture for wireless simulation in ns-2 applied to impulse-radio ultra-wide band networks.
- [39] Ns-2 ultra wide-band (uwb) mac and phy simulator. <http://lrcwww.epfl.ch/uwb/ns-2/index.html>.
- [40] Øyvind Kleppe Asphjell and Håvard Lande. Biomedisinsk sensor-nettverk basert på zigbee og ultra wide band impulsradio. 2007.
- [41] Cc2420 - 2.4 ghz ieee 802.15.4 / zigbee-ready rf transceiver. <http://www.chipcon.com/files/CC2420 Data Sheet 1 4.pdf>, 2007.

- [42] Bruno Bougard, Francky Catthoor, Denis C. Daly, Anantha Chandrakasan, and Wim Dehaene. Energy efficiency of the iee 802.15.4 standard in dense wireless microsensor networks: Modeling and improvement perspectives. *Proceedings -Design, Automation and Test in Europe, DATE '05*, I:196 – 201, 2005.
- [43] Panasonic cr2477-1hf coin cell lithium battery. <http://www.apexbattery.com/panasonic-cr2477-1hf-coin-cell-lithium-battery-3-pack-lithium-batteries.html>, 2007.
- [44] Imec home page. <http://embedded-system.net/digital-uwv-transmitter-ic-for-ieee-802154a-imec.html>.
- [45] Imec home page. <http://www.imec.be/wwwinter/mediacenter/en/SR2006/681539.html>.
- [46] M. Goel and N.R. Shanbhag. Low-power channel coding via dynamic reconfiguration. *1999 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings. ICASSP99 (Cat. No.99CH36258)*, vol.4:1893 – 6, 1999//.
- [47] Amphion. Quickdsp ql7180 rsencoder data sheet.
- [48] E. Shih, B.H. Calhoun, Seong Hwan Cho, and A.P. Chandrakasan. Energy-efficient link layer for wireless microsensor networks. *Proceedings IEEE Computer Society Workshop on VLSI 2001. Emerging Technologies for VLSI Systems*, pages 16 – 21, 2001//.

TILLEGG A

CSMA/CA algoritmen i IEEE 802.15.4

A.1 Unslotted CSMA/CA

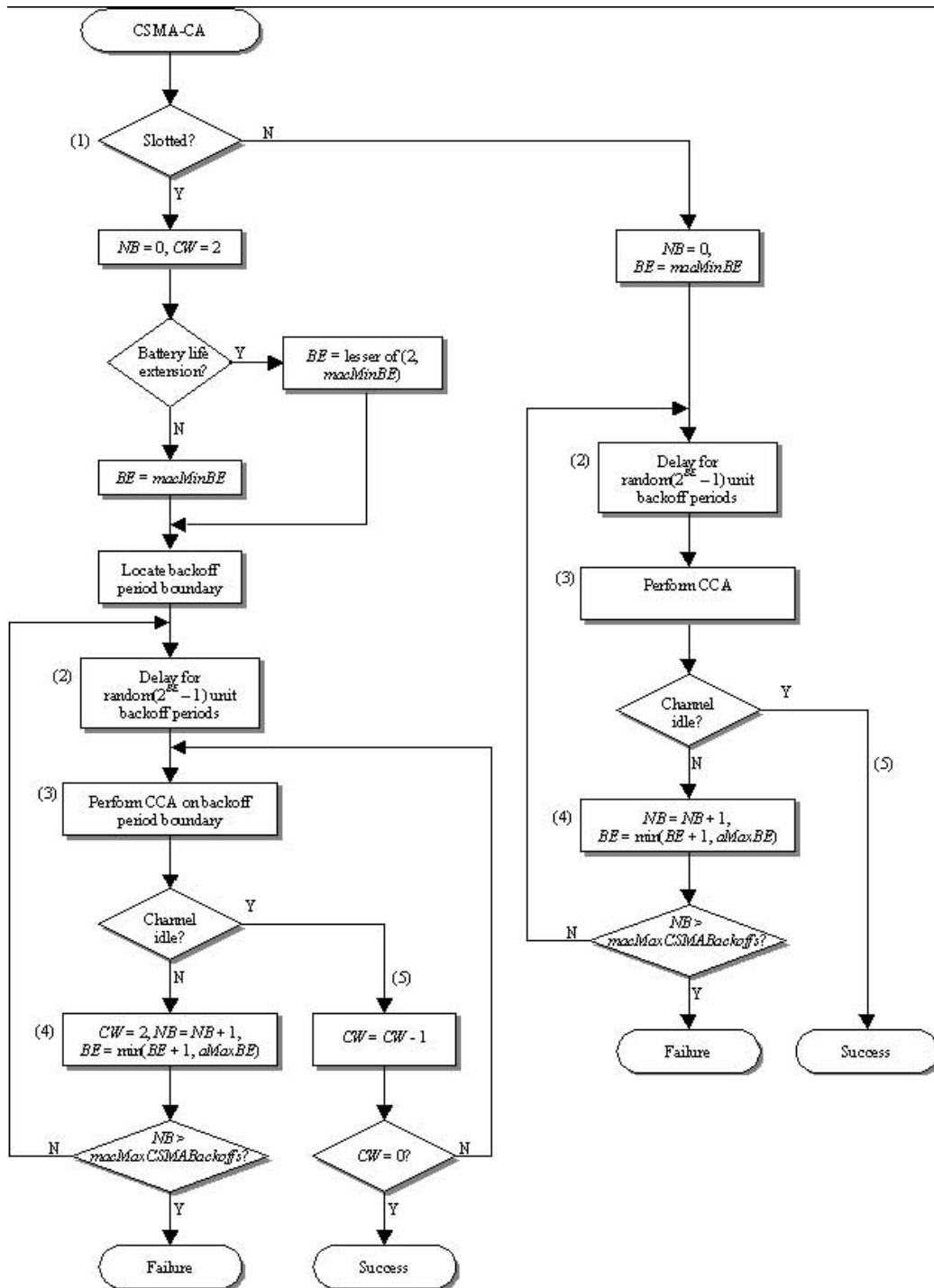
I unslotted CSMA/CA settes først variablene NB og BE. NB er antall backoff som er fullført og settes til null. BE er backoff eksponenten og sier noe om hvor mange backoffperioder en enhet skal vente før den forsøker å sjekke kanalen. Denne settes til `macMinBE` som er brukerdefinert og ligger i intervallet 0 til 5. Deretter finnes et tilfeldig antall backoffperioder, i intervallet 0 til $2^{BE} - 1$, som enheten må vente før den utfører CCA. I dette tidsintervallet gjøres ingenting. Etter dette utføres CCA for å sjekke om kanalen er ledig. Er kanalen ledig sender noden en pakke. Hvis kanalen er opptatt settes NB til NB+1 og BE til BE+1. Hvis antall fullførte backoff, NB, er mindre enn det maksimalt tillatte verdien starter prosessen på nytt. Hvis maksimum antall backoff er fullført rapporteres transmisjonsfeil.

A.2 Slotted CSMA/CA

Ved bruk av slotted CSMA/CA utføres sjekking av kanalen ved definerte tidsgrenser. I tillegg defineres *Contention Window* (CW) som er det antall

ganger enheten må finne ut at kanalen er ledig før den kan sende pakken. CW settes til 2 hver gang en transmisjon startes og tilbakestilles til 2 hver gang kanalen er funnet opptatt. I slotted CSMA/CA har man i tillegg muligheten til å benytte en modus for å øke levetiden til noden. I denne modusen blir det satt restriksjoner til BE og ventetiden for å aksessere kanalen minkes. Som i unslotted rapporteres transmisjonsfeil hvis maksimum antall backoff er fullført.

CSMA/CA algoritmen er vist i figur A.1.



Figur A.1: CSMA/CA algoritmen

TILLEGG B

Kanalmodell

B.1 UWB Path Loss Characterization In Residential Environments

UWB Path Loss Characterization In Residential Environments [36] er en statistisk modell basert på over 300000 målinger i 23 forskjellige hjem. Forplantningstapet til signalet er i denne modellen gitt ved

$$PL(d)|_{dB} = [PL_0 + 10\mu_r \cdot \log_{10}d] + [10n_1\sigma_\gamma \cdot \log_{10}d + n_2\mu_\sigma + n_2n_3\sigma_\sigma] \quad (\text{B.1})$$

I likning B.1 representerer første del median forplantningstap og den andre delen representerer tilfeldig variasjon rundt denne. PL_0 , *intercept point*, er her gjennomsnittlig forplantningstap med referanse til 1 m. Parametrene for LOS og NLOS miljø er gitt i tabell B.1.

	LOS		NLOS	
	Mean	St.Dev	Mean	St.Dev
$PL_0(dB)$	47	NA	51	NA
γ	1,7	0,3	3,5	0,97
$\sigma(dB)$	1,6	0,5	2,7	0,98

Tabell B.1: Statistiske verdier av pathlossparametrene

TILLEGG C

Bruk av programkode

C.1 $(UWB)^2$ i OMNeT++

C.1.1 Installasjonsinstruksjon

- Pakk ut vedlagt zip-fil i OMNeT++ katalogen
- Bruk kommandoen `opp_makemake -f` for å generere en ny Makefil. Ta først backup av den gamle makefilen da verdien `EXTRA_OBJS` må kopieres over til den nye.
- Før simulatoren kompiles ved `make` gå inn i underkatalogen *Libs* og kompiler følgende fire filer: `PacketDescriptor.cc`, `Connection.cc`, `connList.cc` og `FPL.cc`. Dette gjøres ved bruk av kommandoen `gcc -c PacketDescriptor.cc`.

C.1.2 Endring av kode

Den opprinnelige koden måtte modifiseres for å kunne simulere tiltenkte scenarier i denne oppgaven. I `MediumAccessControl.cc` har følgende blitt endret.

For å endre oppsett av scenario:

```
{C}
//Ca linje 1131
//Kode for node i midten og sendere plassert tilfeldig rundt denne.
/*if (indice == (numnodi-1)) //endret av helten
{
xr = area_dim/2;
yr = area_dim/2;
}
else
{
    xr = genk_uniform (1, 0, area_dim);
    yr = genk_uniform (1, 0, area_dim); //endring kode slutt

}*/
//Kode for medisinsk scenario
if (indice < 4)
{
xr = 1.5 + (indice*0.15);
yr = 1.5;
}
else
{
xr = 1.5 + ((indice-4)*0.15);
    yr = 3.5;
}
if (indice == (numnodi-1))
{
xr = area_dim;
yr = area_dim/2;
}
//endring kode slutt
```

Videre må følgende deler av koden modifiseres slik at alle sender til en mottaker og mottakeren ikke sender ut datapakker selv:

```
{C}
//ca linje 1222
//kode endret av helten
```



```

if (indice<numnodi-1)
{
    cMessage *msg1 = new cMessage; //inizializza generazione traffico
    msg1->setKind (GENERATRAFFICO);
    msg1->setName ("GENERATRAFFICO");
    scheduleAt (simTime () + exponential(interarrivo, 1), msg1);
}

//ca linje 813
//02/08/2002 Inserito da Luca: funzione che genera le MAC PDU
void trafficGen (int *PDUNumber, int *receiverID)
{
    //kode endret av helten
*PDUNumber = genk_intuniform(1,1,MAXPDU);
    *receiverID = numnodi -1;
//endring kode slutt

    /*Opprinnelig kode
*PDUNumber = genk_intuniform(1,1,MAXPDU);
    *receiverID = indice;
while((*receiverID) == indice)
    {
*receiverID = genk_intuniform(1,0,numnodi-1);
    }*/
}

```

C.1.3 Bruk av kode

For å sette opp simuleringen må parametre i filen `omnetpp.ini` settes. Disse er presentert i tabell C.1.3.

For å velge om man vil kjøre simulering med grafisk animasjon eller uten må følgende linjer endres i makefilen:

- `USERIF_LIBS=$(TKENV_LIBS)` beholdes for grafisk simulering
- `USERIF_LIBS=$(CMDENV_LIBS)` beholdes for simulering i kommandolinjen

<i>Parameternavn</i>	<i>Forklaring</i>
<i>rete.nummodi</i>	<i>Setter nodeantallet</i>
<i>rete.MACPDUSize</i>	<i>Forandrer størrelsen på MAC pakken</i>
<i>rete.area size</i>	<i>Forandrer størrelsen på scenario</i>
<i>rete.rangetx</i>	<i>Bestemmer hvilke noder som er koblet sammen settes til 2* <i>rete.area size</i></i>
<i>rete.interarrivo</i>	<i>Setter pakkeintervallet</i>

Tabell C.1: Parametre i (UWB)²

Simuleringen kjøres ved bruk av kommandoen `./UWB_2` .