



Arlindo Bengui André

arlindoa@student.matnat.uio.no

Masterstudier i Elektronikk og datateknologi

Innlevert: Oktober, 2009

Veileder: Josef Noll, UiO/UniK

Universitet i Oslo/ Universitetsstudiene på Kjeller

Fagområder: Institutt for Informatikk, Sikkerhet og Mobilitet (I:SIM)

Forord

Denne avhandlingen er presentert som en del av det toårige mastergradsstudiet i Elektronikk og datateknologi i studieretningen Signalbehandling og kommunikasjon. Avhandlingen er gjennomført ved UiO/UniK i løpet av Høsten 2009.

Jeg bestemte meg for denne interessante oppgaven etter noen samtaler med studielederne ved både Institutt for Informatikk (IFI) og Universitetsstudiene på Kjeller. Jeg hadde andre alternativer å velge mellom, men besluttet å skrive denne oppgaven som gjenspeiler signalbehandling og kommunikasjon i bredbånd mobil aksess sammenheng.

Forkunnskapene mine om dette tema var kun basert på generelle akademiske kunnskaper om mobilkommunikasjonssystemer og Wireless Broadband Access hvor fremveksten av den standardbaserte teknologien WiMAX og den cellulære LTE-teknologien har sine røtter. Videreutvikling av disse løsningsvarianter i nær fremtid motiverer meg til å velge denne oppgaven.

Dessuten fikk jeg gode råd underveis angående valg av oppgave, og jeg vil gjerne benytte anledningen til å takke de mange som har hjulpet meg på en eller annen måte i løpet av dette arbeidet. Først og fremst går min anerkjennelse og takk til min familie for deres engasjement, offer og deres konsekvente oppmuntring og ubetingede støtte. Jeg ønsker å uttrykke min takknemlighet til min veileder, Prof. Josef Noll ved UniK som har bidratt med god veiledning og verdifulle innspill underveis. Videre vil jeg også takke alle som har vært direkte eller indirekte involvert i dette arbeidet.

Abstrakt

International Mobile Telecommunications – Advanced (IMT-A) er en utviklingsstandard som er i gang med standardiseringsprosessen. IMT-A er et konsept fra ITU (International Telecommunication Union) som tar høyde for neste generasjons mobilnett med høy datahastighet, sømløs tilkobling og mobilkommunikasjon i heterogene nettverk.

Hovedmålet med oppgaven er å vurdere ytelsessammenligning av fremtidige mobilkommunikasjonsstandarder. Long Term Evolution (LTE), mobile Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX), og Ultra Mobile Broadband (UMB) er i hovedsak de IMT-A dominerende mobilteknologiene i denne oppbyggingsfasen [32]. Fokus med studien var opprinnelig å utføre og sammenligne ytelse ved simulasjoner mellom LTE (E-UTRAN + EPC) og Mobile WiMAX for typiske radiomiljø. På grunn av uhensiktsmessige situasjoner med simuleringsverktøy brukt for dette formålet, viste det seg imidlertid at jeg ikke kunne simulere LTE i det hele tatt. Simuleringsverktøyet (OPNET) krever en komplett oppsetting av OFDM fysiske lags parametere for å muliggjøre en rammeoppbygging. Noen av disse attributter benyttet for definisjon av den OFDM fysiske profilen (f.eks. delbærer-mollomrom) er definert i OPNET på forhånd, dette gjør en umulig å kunne tilpasse disse attributtene som er ulike i LTE-system, se detaljer om dette i vedlegg A (figur A.4.1-12).

Ultra Mobile Broadband (UMB) var navnet gitt på et 3GPP2 Prosjekt basert på CDMA2000 mobil standard. Hensikten med prosjektet var å forbedre og føre standarden videre til neste generasjon i mobilkommunikasjon med trådløsgrensesnitt. Qualcomm som var hovedsponsor av UMB prosjektet, annonserte i november 2008 at de hadde stoppet UMB utviklingen [33], og fokuserer i stedet sine ressurser på LTE.

Det er referert i kapittel 1 at oppgaven er delt i to: teoretisk og praktisk, der den praktiske delen som går ut på Link-nivå simuleringer (kapittel 5) ved hjelp av OPNET, gjennomføres i det Fysiske laget og MAC laget, mens den andre delen er sluttrapporten.

I dette arbeidet er en dyp sammenligning av 3GPP LTE og WiMAX blitt presentert med fokus på radiogrensesnittets ytelse. Selv om begge teknologiene gir omfattende og avanserte funksjonsinnhold, skaper forskjellen i design av radiogrensesnitt typiske effekter som er grundig vurdert og forklart i denne rapporten. Likevel er den generelle radioytelsen ganske lik, med LTE noe fordelaktig framfor WiMAX på grunn av lavere ekstra plassbehov (overhead). Nedlink aksessmetoden (f.eks. fra basestasjon til mobilstasjon) for LTE og WiMAX er OFDMA, mens for LTE opplink benyttes SC-FDMA hvilket gir en løsning på PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) som oppleves ved WiMAX OFDMA opplink. På grunn av dette ønsker WiMAX å gjøre noe med det, slik at de kan holde fast ved de konkurrerende teknologiene.

Det er også bevist at bitraten i LTE er noe høyere enn i WiMAX. Årsaken er at kanalbandbredden, moduleringsmetoden og det fysiske lagets design har en viktig innflytelse på datahastighet. Dette utkonkurrerer WiMAX overfor LTE på grunn av fysiske lags design (f.eks. i tidslukke strukturering – sikkerhetstida, ekstra informasjonsbånd og delbærerband). Den maksimale brukerdataraten for WiMAX (målt verdier i OPNET) er 64.8 Mbps og 29.2 Mbps for nedlink og opplink henholdsvis. På den andre siden, anslår litteraturen at den maksimale LTE-dataraten ligger på 86.4 Mbps og 55.5 Mbps for nedlink og opplink henholdsvis. Merk at disse tallene er baserte på det fysiske lagets brukerdatarater med overheaders inkludert (MIMO-teknikker er ikke inkludert).

Mobile WiMAX støtter smartantenne teknologier som Beamforming (DL=2x1, UL=1x2), Space Time Coding – STC(2x1) og rom multipleksing (DL=2x2, UL=1x2). I teori ville rom multipleksing i WiMAX fordoble den nedlink dataraten mens opplink dataraten ville holde seg uforandret. På den andre siden, har LTE to MIMO tekniske familier, nemlig MU-MIMO (Multi User – Multiple Input Multiple Output) og SU-MIMO (Single User – MIMO) [18]. I utgangspunkt skal LTE implementere 4x2 SU-MIMO modusen (fire antenner på basestasjon eller eNodeB og to antenner på mobilstasjon), det vil si at per-bruker topp datarater ville øke for både nedlink- og opplink-retning. Dette gir LTE langt bedre gjennomstrømning enn WiMAX.

Fra et markeds perspektiv, har WiMAX utmerket seg mer enn LTE på grunn av sin tidligere implementering. WiMAX kom først ut i 2007/08, og flere nettverker skal være tilgjengelige senere i år. LTE derimot er ennå ikke rullet ut, selv om noen eksperimentelle nettverker er i gang, er den effektive implementering forventet i 2010/12.

Figurer

Figur 4.2-1a	Konvensjonal FDM versus OFDM	17
Figur 4.2-1b	Ortogonalitet i OFDM	17
Figur 4.2-2	OFDM-symbol i tidsdomene og syklisk prefiks, CP	18
Figur 4.2-3	OFDM-symbol i frekvensdomene	19
Figur 4.2-4	OFDMA symbol og delkanaler i frekvensdomene	22
Figur 4.2-5	Eksempel på Dataområde ved OFDMA allokering	24
Figur 4.2-6	Kanalkodingsprosess for transmisjon	25
Figur 4.2-7	OFDMA-ramme i TDD modus	26
Figur 4.2-8	Generelle PDU og SDU i protokollstakk	28
Figur 4.2-9	IEEE Std 802.16 referansemodell for protokoll	29
Figur 4.2-10	MAC PDU formater	31
Figur 4.2-11	WiMAX arkitektur for adaptiv svitsjing over smart antenner	33
Figur 4.2-12	Tre fundamentale multiple antennteknikker	34
Figur 4.3-1	Grunnleggende rammestruktur	38
Figur 4.3-2	TDD rammestruktur og PS (Physical Slots)	39
Figur 4.3-3	Super ramme, delramme, og OFDM-symboler i TDD	40
Figur 4.3-4	Distribuerte eller lokaliserte ressursallokering	41
Figur 4.4-1	Arkitektur for radiogrensesnitts protokoll	46
Figur 4.4-2	Ressursgitter med normal CP for LTE	48
Figur 4.4-3	Opplink fysiske kanalbehandling for LTE	49
Figur 4.4-4	Randomaksess preamble format	50
Figur 4.4-5	Tids- frekvensressurser	52
Figur 4.4-6	Nedlink ressursgitter	53
Figur 4.4-7	Oversikt over nedlink fysiske kanalbehandling	56
Figur 4.4-8	Rammestruktur for FDD-type 1	59
Figur 4.4-9	Ramme struktur for TDD-type 2	59

Figur 4.4-10	Opplink tidslukestruktur med sju SC-FDMA-symboler	61
Figur 4.4-11	Opplink tidslukestruktur med seks SC-FDMA-symboler	61
Figur 4.4-12	Nedlink tidslukestruktur med utvidede CP	62
Figur 4.4-13	Opplink-Nedlink synkroniseringsforhold	63
Figur 4.4-14	Generelle protokollarkitektur for radionett	63
Figur 4.4-15	MRC vs MIMO sender-mottaker	66
Figur 4.4-16	MRC i en frekvensselektiv fading kanal	66
Figur 4.4-17	MIMO og kanalrespons	67
Figur 4.5-1	Utvikling av mobile kommunikasjonsstandarder	68
Figur 4.5-1a	WiMAX Nettverks Referanse Modell (NRM)	70
Figur 4.5-1b	LTE arkitektur (EPS)	70
Figur 4.5-2	OFDMA/SC-FDMA Sender-Mottaker strukturer	73
Figur 4.5-3	LTE' skjematisk oversikt for DL kodingsprosess	78
Figur 5.2-1	Kanalmodell oppsetting i OPNET	83
Figur 5.4-1	OPNET scenario	86
Figur 5.4-2	Datarater versus Syklisk Prefikser	89

Tabeller

Tabell 2.1-1	IMT-A scenarier og ITU-kanalmodeller	2
Tabell 2.2-1	IMT-Advanced minstekrav	3
Tabell 2.2-2	Mobilitetsklasser og datarater trafikk-kanal	5
Tabell 2.2-3	Handover oppholdstida	5
Tabell 2.3-1	Evalueringskriterium	6
Tabell 2.3-2	Krav for basislinje evaluering	7
Tabell 2.3-3	Parametere for linkbaserte simuleringer	7
Tabell 2.4-1	Frekvensspektrum identifisert for IMT-A	8
Tabell 3.7-1	Simuleringsverktøy oversikt	10

Tabell 4.2-1	IEEE 802.16 Standarder grunnlagsdata	12
Tabell 4.2-2	Trender for WiMAX systemer	14
Tabell 4.2-3	UL OFDM parametere i WiMAX systemer	16
Tabell 4.2-4	Primitive og Deriverte OFDM-symbols parametere	20
Tabell 4.2-5	Oversamlingsfaktor, n og G-forholdsfaktor	20
Tabell 4.2-6	OFDMA DL allokering av delbærere med PUSC	23
Tabell 4.2-7	OFDMA UL allokering av delbærere med PUSC	23
Tabell 4.2-8a	Delkanal indeks av de seks delkanalgruppene	28
Tabell 4.2-8b	Kort illustrasjon om kanaldeling i Mobile WiMAX	28
Tabell 4.2-9	Flytingstjenester og QoS parametere	31
Tabell 4.3-1	OFDMA parametere for IEEE 802.16m	37
Tabell 4.3-2	Delramme typer for IEEE 802.16m	37
Tabell 4.3-3	TTG og RTG	39
Tabell 4.3-4	Sammenligning av IEEE 802.16 standarder	42
Tabell 4.4-1	Utvikling av cellulære teknologier	43
Tabell 4.4-2	LTE tekniske krav	44
Tabell 4.4-3	Parametere for ressursblokk i LTE	47
Tabell 4.4-4	PUCCH formater	49
Tabell 4.4-5	Randomaksess preamble parametere	50
Tabell 4.4-6	Syklisk Prefiks i SC-FDMA	50
Tabell 4.4-7	SC-FDMA moduleringsparametere for LTE opplink	51
Tabell 4.4-8	Fysiske ressurseblokker parametere for nedlink	53
Tabell 4.4-9	Nedlink fysiske ressurser vs båndbredder	54
Tabell 4.4-10	Modulasjonsmetoder for PDSCH og PMCH kanaler	56
Tabell 4.4-11	PDCCH formater	57
Tabell 4.4-12	Parametere for OFDM signal	57
Tabell 4.4-13	OFDMA parametere for LTE nedlink	58
Tabell 4.4-14	Opplink-Nedlink oppsetting (omkoplingspunkter)	60
Tabell 4.4-16	konfigurasjon av Spesielle delrammer	62

Tabell 4.5-1	Referanser som legges til grunn for sammenligning	69
Tabell 4.5-2	Frekvens spektrum for WiMAX	71
Tabell 5.5-3	Frekvens spektrum for LTE	71
Tabell 4.5-4	Systemer og Teknologier oppsummering	72
Tabell 4.4-5	Mobile WiMAX PHY Datarater med PUSC kanaldeling	74
Tabell 4.5-6	DL og UL avanserte antennteknikker for mWiMAX	75
Tabell 4.5-7	Datarater for SIMO/MIMO konfigurasjoner, mWiMAX	75
Tabell 4.5-8	LTE CQI (Channel Quality Information) tabell	76
Tabell 4.5-9	LTE Datarater for DL	78
Tabell 4.5-10	LTE Datarater for UL	79
Tabell 4.5-11	Tids- og Frekvens ressursenheter for rammestrukturering	79
Tabell 5.1-1	WiMAX applikasjonsklasser	82
Tabell 5.3-1	DL og UL simulasjonsparametere for Mobile WiMAX i OPNET	83
Tabell 5.3-2	DL og UL delrammer forhold for TDD i WiMAX	85
Tabell 5.4-1	Test Case – WiMAX vs mine simulasjoner i OPNET	87
Tabell 5.4-2	Trafikk datarater simulerte for nedlink og opplink	88
Tabell 5.4-3	Maksimal datarate ved å benytte Test Caset i OPNET	89
Tabell 5.4-4	DL maksimal datarate med (1:0) konfigurasjon	90
Tabell 5.4-5	UL maksimal datarate med (0:1) konfigurasjon	90
Tabell 5.4-6	DL og UL Datarater ved Standard konfigurasjon (3:1)	91

Innholdsfortegnelse

Forord	ii
Abstrakt	iii
Figurer	v
Tabeller	vi
Forkortelser	xiii
1. Problemet beskrivelse	1
2. Scenario for fremtidige mobilkommunikasjon (IMT-A)	2
2.1. Bruksområde/scenario	2
2.2. Radiogrensesnittskrav og teknologiske utfordringer	3
2.2.1. Celle spektral effektivitet	3
2.2.2. Topp spektral effektivitet	3
2.2.3. Båndbredde	4
2.2.4. Spektral effektivitet ved cellerand	4
2.2.5. Latenstid	4
2.2.5.1. Kontrollflate Latenstid	4
2.2.5.2. Brukerflate Latenstid	4
2.2.6. Mobilitet	4
2.2.7. Handover	5
2.3. Kriterium for evaluering	5
2.3.1. Basislinje konfigurasjon	6
2.4. Frekvens Spektrum	8
3. Valg av simuleringsverktøy	8
3.1. Simuleringsverktøys krav	8
3.1.1. Simuleringsscenarier	8
3.1.2. Anbefaling fra fagmiljøer	9
3.2. JavaSim	9
3.3. NS2	9
3.4. OMNET++	9
3.5. OPNET	10
3.6. Matlab og Simulink	10
3.7. Simuleringsverktøy oversikt	10
3.7.1. Konklusjon	10
4. WiMAX versus LTE	11
4.1. Introduksjon	11
4.2. IEEE 802.16 og WiMAX	11
4.2.1. IEEE 802.16-2001	11
4.2.2. IEEE 802.16-2004	11
4.2.3. IEEE 802.16e-2005	12
4.2.4. IEEE 802.16 TM – 2009	12
4.2.5. Systemprofiler og Sertifiseringsprofiler	13
4.2.6. Teknologiske trender – WiMAX egenskaper	14
4.2.7. WiMAX Fysisk lag	15
4.2.7.1. Implementering av WiMAX OFDM-PHY	16
4.2.7.2. OFDM prinsipper	17
4.2.7.3. WirelessMAN OFDM fysiske lag	18

4.2.7.3.1.	OFDM symbol i tidsdomene	18
4.2.7.3.2.	OFDM symbol Frekvensdomene	18
4.2.7.3.3.	Fordeler og ulemper ved OFDM	19
4.2.7.3.4.	OFDM symbol parametere	20
4.2.7.4.	WirelessMAN OFDMA fysiske laget	21
4.2.7.4.1.	OFDMA symbol i tidsdomene	21
4.2.7.4.2.	OFDMA symbol i frekvensdomene	21
4.2.7.4.3.	OFDMA allokering av delbærere	22
4.2.7.4.4.	OFDMA basiske betegnelser – definisjon	24
4.2.7.4.5.	Tidsluke og Ramme struktur	25
4.2.7.4.6.	Ramme lengde	26
4.2.7.4.7.	Rekkevidde kanal	27
4.2.7.4.8.	CQICH kanal og ACK kanal	27
4.2.7.4.9.	Kanaldeling	27
4.2.8.	IEEE 802.16 MAC-laget overblikk	28
4.2.8.1.	IEEE 802.16 MAC-laget og funksjoner	30
4.2.8.2.	MAC PDU formatter	31
4.2.8.3.	MAC støtte over PHY sendemodus	32
4.2.9.	Multi Antenne Teknikker	32
4.2.9.1.	Fordeler av Spatial diversitet	33
4.2.9.2.	Mottaker diversitet	34
4.2.9.3.	Sender diversitet	34
4.3.	IEEE 802.16m (IMT-A)	35
4.3.1.	Generelle krav	35
4.3.2.	IEEE 802.16m fysiske lag	36
4.3.2.1.	Dupleks modus	36
4.3.2.2.	Nedlink og Opplink Multippel aksess metoder	36
4.3.2.3.	OFDMA parametere for IEEE 802.16m	36
4.3.2.4.	Rammestruktur	37
4.3.2.5.	Illustrasjon av rammestruktur (regneverk)	38
4.3.2.6.	Opplink fysiske struktur	40
4.3.2.7.	Den fysiske og logiske ressursenheten for UL	41
4.3.2.8.	Kanaldeling og ressursavbildning UL	41
4.3.2.9.	Fysiske struktur for nedlink	41
4.3.2.10.	Den fysiske og logiske ressursenheten for DL	41
4.3.2.11.	Kanaldeling og ressursavbildning DL	42
4.3.2.12.	802.16e-2005 vs 802.16m	42
4.4.	LTE	43
4.4.1.	Overblikk over cellulære teknologier	43
4.4.2.	Introduksjon om LTE	44
4.4.3.	LTE Tekniske krav	44
4.4.4.	LTE fysiske lag	45
4.4.4.1.	PHY lags tjenester til høyere lag	46
4.4.4.2.	Generelle beskrivelse av LTE-PHY lag	46
4.4.4.2.1.	Multippel aksess	47
4.4.4.2.2.	Fysiske kanaler og modulasjon	47
4.4.4.2.3.	Opplink fysiske laget	47
4.4.4.2.4.	SC-FDMA mod. parametere for LTE	51
4.4.4.2.5.	Nedlink fysiske laget	51
4.4.4.2.6.	OFDMA mod. parametere for LTE	58

	4.4.4.2.7. LTE radoramme og tidsluka strukturer	58
	4.4.4.3. Opplink-Nedlink ramme synkronisering	63
4.4.5.	LTE MAC laget	63
	4.4.5.1. MAC arkitektur	63
	4.4.5.2. MAC kanaler	64
	4.4.5.3. MAC tjenester	65
	4.4.5.4. MAC funksjoner	65
	4.4.5.5. MIMO og MRC i LTE	65
4.5.	LTE vs Mobile WiMAX (sammenligning)	68
	4.5.1. Introduksjon	68
	4.5.1.1. WiMAX arkitektur	69
	4.5.1.2. LTE arkitektur	70
	4.5.2. Radiogrensesnitt	71
	4.5.2.1. Frekvensspektrum og radioaksess modus.....	71
	4.5.2.2. Fysiske lag oversikt	72
	4.5.2.2.1. Kommentarer over tabell 4.5-4	73
	4.5.2.2.1.1. Nedlink aksessesteknologi	73
	4.5.2.2.1.2. Opplink aksessesteknologi	73
	4.5.2.2.1.3. Fysiske datarater	74
	4.5.2.2.1.4. Kanaldeling	77
	4.5.2.3. Rammestrukturer og modulasjonsparametere	79
	4.5.2.3.1. Kommentarer over tabell 4.5-11	80
	4.5.2.3.1.1. Delbærere mellomrom	80
	4.5.2.3.1.2. Syklisk Prefiks (CP)	80
5.	Mobile WiMAX simulasjoner i OPNET	80
	5.1. Bruker scenario	81
	5.2. Kanal modell	82
	5.3. Forutsetninger og parametere valg	83
	5.3.1. Gerenell formel for mottakers følsomhet, R_{SS}	85
	5.4. OPNET Scenario	85
	5.4.1. Test Case scenario og simulasjonsresultater	86
	5.4.1.1. Diskusjon	88
	5.4.2. Gjennomstrømning vs Syklisk Prefiks	89
	5.4.3. Simulasjon med standard oppsetting	90
6.	Evaluering	91
	6.1. Frekvensspektrum versus rekkevide	91
	6.2. Delbærere og Syklisk Prefiks vs rekkevidde	92
	6.3. Delbærere og datakapasitet	93
	6.4. CP-lengde versus Data-lengde (nyttelast)	93
	6.5. OFDMA versus SC-FDMA	94
7.	Konklusjon	95
8.	Referanser	96

Vedlegg A:	OPNET brukerveiledning	98
A.1.	Om Modeller	99
A.2.	Åpning av veiledningsfiler	99
A.3.	OPNET Modeler- funksjoner og editorer	100
A.3.1.	OPNET Modeler- arbeidsforløp	100
A.3.2.	Prosjektet Editor	101
A.3.3.	Node Editor	101
A.3.4.	Prosess Modell Editor	102
A.3.5.	Link Modell Editor	102
A.3.6.	Bane Editor	103
A.3.7.	Etterspørsel Editor	103
A.3.8.	Måleverdigiver Editor	104
A.3.9.	Simuleringssekvens Editor	104
A.3.10.	Antenne mønster Editor (med trådløs funksjonalitet)	104
A.3.11.	Filter Editor	104
A.3.12.	ICI (Interface Control Information) Editor	105
A.3.13.	Modulasjonskurve Editor (med trådløs funksjonalitet)	105
A.3.14.	Pakkeformat Editor	105
A.3.15.	PDF Editor	105
A.3.16.	Prosjektet-vindu Editor	106
A.3.17.	Dokumentasjon	107
A.3.18.	Generell oversikt over alle editorer	108
A.4.	OPNET Scenario oppsetting	108
A.4.1.	WiMAX Config	108
A.4.2.	Basestasjons konfigurasjon	112
A.4.3.	Mobilstasjonsattributter konfigurasjon	114
A.4.4.	WiMAX nettverksanalyse	117
Vedlegg B:	Trådløse kanalmodeller:	119
B.1	Grunnleggende konsepter	119
B.1.1.	Trådløs Kanal	119
B.1.2.	Banetap	119
B.1.2.1.	Grunnleggende utbredelsesbegreper	120
B.1.3.	Skygge	121
B.1.4.	Flerveis utbredelse	121
B.1.5.	Doppler spredsspektrum	123
B.2.	Empiriske banetap modeller	123
B.2.1.	Hata banetap modell	124
B.2.2.	ITU banetap modeller	125
B.2.3.	COST 231 Hata- vs ITU-modeller (Matlab)	128

Forkortelser

3GPP	Third Generation Partnership Project
AAS	Advanced Antenna System
ACK	Acknowledgement
ADC	Analog-to-Digital Converter
AIPN	All Internet Protocol Network
AMC	Adaptive Modulation and Coding
AP	Access Point
ARQ	Automatic Repeat Request
BER	Bit Error Rate
BLER	Block Error Rate
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BS	Base Station
BTC	Block Turbo Coding
BW	Bandwidth
CC	Convolution Coding
CDMA	Code Division Multiple Access
CDMA EV-DO	CDMA Evolution – Data Optimized
CIR	Carrier to Interference Ratio
CN	Core Network
CP	Cyclic Prefix
C-Plane	Control Plane
CRC	Cyclic Redundancy Check
CS	Convergence Sub-layer
CTC	Convolution Turbo Coding
DAC	Digital-to-Analog Converter
DFT	Discrete Fourier Transform
DVB-H	Digital Video Broadcasting - Handheld
EDGE	Enhanced Data Rates for Global Evolution
EPC	Evolved Packet Core
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
E-UTRA(N)	Evolved – UMTS Terrestrial Radio Access (Network)
FCH	Frame Control Header
FDD	Frequency Division Duplex
FDM	Frequency Division Multiplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transform
FUSC	Full Usage of Sub-Carriers
GERAN	GSM EDGE Radio Access Network
GP	Guard Period
GSM	Global System for Mobile Communications
HARQ	Hybrid Automatic Repeat request
HO	Handover
HSD(U)PA	High Speed Downlink (Uplink) Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
ICI	Inter Carrier Interference
IDFT	Inverse DFT
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFFT	Inverse FFT
IMT-A	International Mobile Telecommunications – Advanced
ITU-R	International Telecommunication Union – Radio communication sector

LTE	Long Term Evolution
MAC	Media Access Control
MAP	Media Access Protocol
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Service
MC	Multi Carrier
MCS	Modulation and Coding Scheme
MIMO	Multiple Input and Multiple Output
MPDU	MAC Protocol Data Unit
MS	Mobile Station
MSDU	MAC Service Data Unit
MU	Mobile User
N/LOS	Non / Line of Sight
OFDM	Orthogonal Frequency Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OPNET	Optimized Network Engineering Tools
OSI	Open System Interconnection
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PDU	Protocol Data Unit
PHY	Physical layer
PMP	Point to Multipoint
PUSC	Partial Use of Sub-Carriers
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RAN	Radio Access Network
RAT	Radio Access Technology
RB	Resource Block
RF	Radio Frequency
RIT	Radio Interface Technology
RLC	Radio Link Control
RRC	Radio Resource Control
RTG	Receive/Transmit Transition Gap
RTD	Round Trip Delay
RX	Receiver/Reception
SAE	System Architecture Evolution
SAP	Service Access Point
SC	Single Carrier
SC-FDMA	Single Carrier – Frequency Division Multiple Access
SDU	Service Data Unit
SFH	Super Frame Header
SINR	Signal to (Interference plus Noise) Ratio
SNR	Signal to Noise Ratio
SRIT	Set of Radio Interface Technologies
SSTG	Subscriber Station Transition Gap
STC	Space Time Coding
TCP/IP	Transmission Control Protocol/ Internet Protocol
TDD	Time Division Duplex
TTI	Transmission Time Interval
TTG	Transmit/Receive Transition Gap
TUSC	Tile Usage of Sub-Channels
TX	Transmitter/Transmission
UE	User Equipment
UL/DL	Uplink / Downlink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UMB	Ultra Mobile Broadband

U-Plane	User Plane
UpPTS	Uplink Pilot Time Slot
VoIP	Voice over IP
VPN	Virtual Private Network
WCDMA	Wideband CDMA
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WirelessHUMAN	Wireless High Speed Unlicensed MAN
WirelessMAN	Wireless MAN
x-DSL	family of - Digital Subscriber Line (L originally for Loop)

1 Problemet beskrivelse

Mobilkommunikasjonsteknologi har utviklet seg raskt de siste årene på grunn av økende behov for tilgang på avanserte teletjenester med en rekke ulike tilbud og bedre kvalitet som inngår i mobilenheter. For å oppfylle disse behovene, har den trådløse telekommunikasjonsindustrien de siste årene arbeidet med å definere radiogrensesnitt som tar sikte på forbedring av den totale systemytelsen ved å øke systemkapasiteten som på en eller annen måte kombineres med spektral effektivitet til en redusert latenstid. Industrien og de andre aktørene fokuserer i tillegg på å kunne levere tjenester og applikasjoner som f.eks. talesignal, data, video og multimediatjenester i samme båndbredde til en tiltenkt mobil sluttbruker. Dette krever blant annet høyere datarater enn dagens tilbud, avanserte aksessesteknologier og sendemoduser.

Oppgaven evaluerer bredbånd mobilkommunikasjonssystemer basert på fremtidige mobile standarder. LTE og Mobile WiMAX er blant de meste omtalte standardene. Fokus i denne studien er å gjennomføre en sammenligning og ytelses-simuleringer mellom 3GPP LTE og Mobile WiMAX.

Avhandlingen er altså gjennomført i to deler: teoretisk og praktisk. Den teoretiske delen gir en kort introduksjon om IMT-A standarder, beskriver den grunnleggende teorien bak begge teknologiene over, samt en kort analyse av radioforplantningsmodeller for bredbånd gjennom trådløse aksessnettverker. I den praktiske delen blir Mobile WiMAX med flere scenarier simulert og følgende resultater er til slutt evaluert. Simuleringer er gjennomført ved hjelp av OPNET Modeller – student utgave, dette er også en del av evalueringen.

Avhandlingen er planlagt for å dekke 30 studiepoeng, med ordentlig start i mai 2009.

2. Scenario for fremtidige mobilkommunikasjon (IMT-A)

De siste 20 årene har ITU vært med å koordinere arbeidsgrupper fra flere sektorer (regjering, industri, og private organisasjoner). Arbeidsgruppene har hensikt til å utvikle et global mobilkommunikasjonssystem som inkluderer bredbånd multimedia kjent for IMT. Den første IMT standardfamilien ble innført i 2000. Statistikken viser at det er mer enn 1 milliard IMT-2000 abonnenter over hele verden [34]. Den samme kilden mener at *IMT-Advanced* vil tilby en globalplattform for å bygge opp de neste generasjonene av mobilsystemer – rask datatilgang, samlet meldingstjenester og bredbåndmultimedia.

For å støtte multimedia og en rekke andre tjeneste baserte på høy servicekvalitet er høy datarate i et kommunikasjonssystem nødvendig. På grunn av at fremtidige mobilsystemer skal som regel operere i frekvensbånd over 2 GHz (tabell 2.3-2), vil overførte data oppleve mer demping av signalstyrke i kommunikasjonsmediet mellom senderen og mottakeren enn for de lavere frekvensbåndene. Dette innebærer mindre cellestørrelse etterhvert frekvensbånd går opp. Videre har dette som følge bruk av flere basestasjoner eller frekvensgjenbruk for å kunne betjene et bestemt dekningsområde. IMT-A har så langt definert mobilbredbånd bruksområder, og disse vil behandles i det neste delkapitlet.

2.1. Bruksområde/scenario

For å evaluere en radiogrensesnitt teknologi (RIT) har IMT-A definert utvalgte scenarier og tilsvarende testmiljøer [1]:

Base coverage urban: er urban makrocellular miljø som fokuserer på kontinuerlig dekningsområde for eksempel fra fotgjenger til og med hurtige kjøretøybrukere. Scenario er interferensbegrenset.

Mikrocellular: er urban mikrocellular miljø som kan defineres av høy nettbrukere trafikk. Dette fokuserer på små celler og tregere kjøretøybrukere. En finner i denne kategorien utendørs og utendørs-til-innesdørs dekningsområder.

Innendørs: er innendørs miljø som tar hensyn på isolerte kontorceller og/eller hotspotbaserte brukere for eksempel de stasjonære og fotgjengere brukerne.

Høy hastighet: scenariet fokuserer på større celler og kontinuerlig dekningsområde. Dette er rural makrocellular scenario som støtter hurtige kjøretøyer, og vil derfor defineres av støy-begrenset og/eller interferens-begrenset scenario.

Utvalgte deployeringsscenarier for evaluering og kanalmodeller				
Testmiljø	Innendørs	Mikrocellular	“Base coverage” urban	Høy hastighet
Deployerings scenario	Innendørs hotspot scenario	Urban mikrocelle scenario	Urban makrocelle scenario	Rural makrocelle scenario
Kanal-modell	InH Innendørs hotspot (LoS, NLoS)	Umi Urban mikro (LoS, NLoS, O-til-I)	UMa, SMa(valgfri) Urban makro (LoS, NLoS)	Rma Rural makro (LoS, NLoS)
Rekkevidde	Fullstendig tabellen finnes i: ([1], Table A1-2)			

Tabell 2.1-1: IMT-A Scenarier og ITU-kanalmodeller. Testmiljø for ”suburban makrocelle” som ikke henvises i tabellen er et alternativ scenario for “base coverage urban”, [1].

2.2. Radiogrensesnittskrav og teknologiske utfordringer

Tabell 2.2-1 viser tekniske ytelseskrav for IMT-A radiogrensesnittskandidater. Tallene og tabellene i dette delkapitlet er hentet fra ITU-R rapport: [1] og [2].

Minstekrav		IMT-A / Referanse	
1	Celle spektral effektivitet	Se ligning (2.1)	
2	Topp spektral effektivitet [bit/s/Hz]	DL: 15, UL: 6.75	
3	Båndbredde [MHz]	FDD: 20, TDD: 40	
4	Cellerandbruker spektral effektivitet	Se ligning (2.2)	
5	Latenstid	Kontrollflate latenstid	< 100 ms
		Brukerflate latenstid	< 10 ms
6	Mobilitet	Se (avsnitt 2.2.6)	
7	Handover	Se (Tabell 2.2-3)	

Tabell 2.2-1: IMT-Advanced minstekrav. FDD står for Frequency Division Duplex, TDD: Time Division Duplex, UL: Uplink og DL: Downlink.

2.2.1 Celle spektral effektivitet

Celle spektral effektivitet (η) er per definisjon summen av gjennomstrømming for alle brukere (antall riktige mottatte bits pr. tidsenhet) delt på kanalbredde som igjen er delt av antall celler. Kanalbredden er i dette tilfellet definert av produkt mellom effektiv båndbredde og frekvensgjennbruksfaktor, hvor den effektive båndbredden er resultat av den normaliserte systembåndbredden (i betraktning av forhold mellom opplink/nedlink). Celle spektraleffektivitet er en parameter som defineres gjennom systembaserte simuleringmetoden. Den er definert i samsvar med følgende ligninga [2]:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^N \chi_i}{T \cdot \omega \cdot M} \quad [\text{bits/s/Hz/Cell}] \quad (2.1)$$

Der N er antall bruker, M er antall celler, ω er kanalbåndbredde, T er den tida som varer for å motta databiter og χ_i tilsvarer antall mottatte databiter for bruker i .

2.2.2. Topp spektral effektivitet

Topp spektral effektivitet er den høyeste dataratene i et kommunikasjonssystem (normalisert av båndbredde). Den er definert som en feil-fri data bitstrøm tildelt en enkelt mobilstasjon når alle tilgjengelige radioressurser for tilsvarende link-retning er brukt opp (ekskludert radioressurser for fysiske lags synkronisering, referanse signaler/piloter, sikkerhetsbånd og sikkerhetsintervall). Topp datarate er gitt ved produktet av topp spektral effektivitet og båndbredde (f.eks. 15 bits/s/Hz \times 20 MHz = 300 Mbps).

2.2.3. Båndbredde

Båndbredden blir skalerbar og den vil variere fra fem til 20 MHz for FDD eller maksimal 40 MHz for TDD. Den skal skales etter behov av brukers datamengde og kanalkapasitet. Alle RITs (Radio Interface technologies) kandidater skal kunne håndtere både FDD og TDD dupleksmoduser, og enten enkeltbærere- eller Multibærere-radiofrekvens.

2.2.4 Spektral effektivitet ved cellerand

Den normaliserte gjennomstrømmingen i avsnitt 2.2.1 karakteriseres som brukermiddelverdien. Spektral effektivitet for brukere ved celleranden er definert som et 5% punkt over CDF (Cumulative Distribution Function) gitt av den normaliserte gjennomstrømmingen. Likninga (2) avgitt i rapport [2] som er gjengitt nedenfor, benyttes for å beregne den normaliserte gjennomstrømmingen til en enkeltbruker.

$$\gamma_i = \frac{\chi_i}{\omega \cdot T_i} \quad [\text{bits/s/Hz}] \quad (2.2)$$

Der γ_i definerer brukerdatarate for bruker i , ω er kanalbåndbredde, T_i er den tida som varer for å motta databiter og χ_i tilsvarer antall mottatte databiter for bruker i .

2.2.5. Latenstid

2.2.5.1. Kontrollflate latenstid

Kontrollflate ventetid (C-Plane) er vanligvis målt som den overgangstida fra ulike forbindelsesmoduser, for eksempel fra inaktiv til aktiv tilstand. En overgangstid (unntatt nedlink paging-forsinkelse og signalsystem-forsinkelse for det trådløse nettverket) skal være mindre enn 100 ms. Denne tidsperioden muliggjør at en brukerflate blir vel etablert.

2.2.5.2. Brukerflate latenstid

Brukerflate latenstid (kjent som transport forsinkelse) er definert som enveis-overgangenstid mellom en SDU-pakke fra den settes tilgjengelig på IP-lag av brukerterminal/basestasjon og tilgjengelighet av denne samme pakken (PDU) på IP-lag i basestasjon/brukerterminal. Pakkeforsinkelsen for brukerflate omfatter forsinkelse av assosiert protokoller og styresignalisering antatt at brukerterminalen befinner seg allerede i den aktive tilstanden. Ventetiden skal være mindre eller lik 10 ms i ubelastede forhold.

2.2.6. Mobilitet

IMT-A definerer følgende mobilbrukere klasser :

- 1) Stasjonær: Null km/h
- 2) Fotgjenger: > 0 – 10 km/h
- 3) Kjøretøy: 10 – 120 km/h
- 4) Høy hastighetskjøretøy: 120 – 350 km/h.

Mobilitetsklasser				
	Test miljø			
	Innendørs	Mikrocellular	Base coverage urban	Høy hastighet (High way)
Mobilitetsklasser støttet	Stasjonær, Fotgjenger	Stasjonær, Fotgjenger, Kjøretøy (maks.30 km/h)	Stasjonær, Fotgjenger, Kjøretøy	Høy hastighetskjøretøy
Datarater for trafikk-kanal forbindelse				
	Bit/s/Hz		hastighet (kmph)	
Innendørs	1.0		10	
Mikrocellular	0.75		30	
Base coverage urban	0.55		120	
Høy hastighet	0.25		350	

Tabell 2.2-2: Mobilitetsklasser og datarater for trafikk-kanal, [2].

2.2.7. Handover

Oppholdstida for Handover er definert som et tidsrom der en brukerterminal ikke får lov til å utveksle pakker (eng. user plane packets) med en basestasjon. Oppholdstida omfatter blant annet den tida som trengs for den involverte enheten å utføre enhver radioaksess nettverksprosedyre, radioaksess styresignaliseringsprotokoll og andre utvekslingsmeldinger mellom brukerutstyr og radioaksess nettverk. Forutsetningen for å avgjøre handovers oppholdstida er at interaksjoner skal forekomme i null tid mellom radioaksess- og kjerne-nettverk (dvs. Nettverksenheter utover radioaksess nettet). Det er også viktig å ha alle nødvendige attributter som for eksempel nedlink synkronisering og opplink aksessprosedyrer av målkanal (eng. target channel) på plass før eller like ved start av handover fra vedkommende brukerkanal (eng. serving channel) til målkanal.

Handovers oppholdstid		
Handover type		oppholdstida (ms)
Intra-frekvens		27.5
Inter-frekvens	Innen samme spektrumsbånd	40
	Mellom ulike spektrumsbånd	60

Tabell 2.2-3: Handover oppholdstida.

2.3. Kriterium for evaluering

Egenskaper for evaluering og avanserte fremgangsmåter for vurdering er oppsummert i tabellen nedenfor. IMT-A definerer tre hovedkriterier [1]:

- 1) Simulering (inkluderer både system- og linknivå simulering).
- 2) Analytisk (via beregning).
- 3) Inspeksjon (ved å vurdere funksjonalitet og parametrisering av forslag).

Egenskaper for evaluering	Metode	Evaluerings metodologi /konfigurasjoner	Relatert avsnitt i Rapporter ITU-R M.2134 og ITU-R M.2133
Celle spektral effektivitet	Simulasjon (system nivå)	§ 7.1.1, Tables 8-2, 8-4 and 8-5	Report ITU-R M.2134, § 4.1
Topp spektral effektivitet	Analytisk	§ 7.3.1, Table 8-3	Report ITU-R M.2134, § 4.2
Båndbredde	Undersøkelse	§ 7.4.1	Report ITU-R M.2134, § 4.3
Cellerand bruker spektral effektivitet	Simulasjon (system nivå)	§ 7.1.2, Tables, 8-2, 8-4 and 8-5	Report ITU-R M.2134, § 4.4
Brukerflate latenstid Rapport	Analytisk	§ 7.3.3; Table 8-2	ITU-R M.2134, § 4.5.2
Kontrollflate latenstid Rapport	Analytisk	§ 7.3.2, Table 8-2	ITU-R M.2134, § 4.5.1
Mobilitets Rapport	Simulasjon (system og link nivå)	§ 7.2, Tables 8-2 and 8-7	ITU-R M.2134, § 4.6
Intra- og inter-frekvens handover oppholdstid	Analytisk	§ 7.3.4, Table 8-2	Report ITU-R M.2134, § 4.7
Inter-system handover Rapport	Undersøkelse	§ 7.4.3	ITU-R M.2134, § 4.7
VoIP kapasitet	Simulasjon (system nivå)	§ 7.1.3, Tables 8-2, 8-4 and 8-6	Report ITU-R M.2134, § 4.8
Deployeringsmulighet i et av identifisert IMT bånd	Undersøkelse	§ 7.4.2	Report ITU-R M.2133, § 2.2
Kanalbåndbredde skalerbarhet	Undersøkelse	§ 7.4.1	Report ITU-R M.2134, § 4.3
Støtte for en rekke ulike tjenester	Undersøkelse	§ 7.4.4	Report ITU-R M.2133, § 2.1

Tabell 2.3-1.: Evalueringskriterium [1].

2.3.1. Basislinje konfigurasjon

Dette avsnittet inneholder to tabeller med parametere som benyttes for å konfigurere systembaserte simulering og linkbaserte simulering for mobilitet henholdsvis.

Parametere for evalueringskonfigurasjon av basislinje					
Deployeringsscenario for evalueringsfremgangsmåte	Innendørs hotspot	Urban mikrocelle	Urban makrocelle	Rural makrocelle	Suburban makrocelle
Basestasjon (BS) antennehøyde	6 m, montert på tak	10 m, under takflate	25 m, over takflate	35 m, over takflate	35 m, over takflate
Antall BS' antennelementer ¹	Opp til 8 rx opp til 8 tx	Opp til 8 rx opp til 8 tx	Opp til 8 rx opp til 8 tx	Opp til 8 rx opp til 8 tx	Opp til 8 rx opp til 8 tx
Total BS sendereffekt	24 dBm for 40 MHz, 21 dBm for 20 MHz	41 dBm for 10 MHz, 44 dBm for 20 MHz	46 dBm for 10 MHz, 49 dBm for 20 MHz	46 dBm for 10 MHz, 49 dBm for 20 MHz	46 dBm for 10 MHz, 49 dBm for 20 MHz
Brukerutstyrs (UT) sendereffekt	21 dBm	24 dBm	24 dBm	24 dBm	24 dBm
UT antenne system ¹	Opp til 2 tx Opp til 2 rx	Opp til 2 tx Opp til 2 rx	Opp til 2 tx Opp til 2 rx	Opp til 2 tx Opp til 2 rx	Opp til 2 tx Opp til 2 rx
Min.avstand mellom UT og brukercelle ²	>= 3 m	>= 10 m	>= 25 m	>= 35 m	>= 35 m
Inter-site avstand [1]	60 m	200 m	500 m	1732 m	1299 m
Bærefrekvens for evaluering (IMT band)	3.4 GHz	2.5 GHz	2.0 GHz	800 MHz	2.0 GHz
Utendørs til Innendørs bygnings penetrasjonstap	Ikke definert	Ikke definert	Ikke definert	Ikke definer	20 dB
Utendørs til inn-kjøretøys penetrasjonstap	Ikke definert	Ikke definert	9 dB (LN, $\sigma = 5$ dB)	9 dB (LN, $\sigma = 5$ dB)	9 dB (LN, $\sigma = 5$ dB)
⁽¹⁾ Antall antenner spesifisert i (§4.2.3 av rapport ITU-R M.2133) bør benyttes for evaluering. ⁽²⁾ I forhold til den horisontale flaten					

Tabell 2.3-2: Krav for basislinje evaluering [2].

Deployeringsscenario for evalueringsfremgangsmåte	Innendørs hotspot	Urban mikrocelle	Urban makrocelle	Rural makrocelle	Suburban makrocelle
Evaluerings-tjenesteprofiler	Full buffer Best-Effort	Full buffer Best-Effort	Full buffer Best-Effort	Full buffer Best-Effort	Full buffer Best-Effort
Kanalmodell	Innendørs hotspots modell (InH)	Urban mikrocelle modell (UMi)	Urban makrocelle Modell (UMa)	Rural makrocelle modell (Rma)	Suburban makrocelle modell (SMa)
Simulasjons båndbredde	10 MHz	10 MHz	10 MHz	10 MHz	10 MHz
Antall bruker i simulasjon	1	1	1	1	1

Tabell 2.3-3: Parametere for linkbaserte simuleringer (mobilitetskrav) [1].

2.4. Frekvens spektrum

ITU-R har utviklet frekvensbånds fordeling som var identifisert av WARC-92 og WRC-2000. De er beskrevet i normanbefaling Rec. ITU-R M.1036-3. Viderearbeid for identifisering av andre frekvensbånd er satt i gang ved ITU-R.

Spektrum	Referanse av Radio Regelverket (RR)
450-470 MHz	Se RR No. 5.286AA
698-960 MHz	Se RR No. 5.317A
1710-2025 MHz	Se RR No. 5.384A
2110-2200 MHz	Se RR No. 5.388
2300-2400 MHz	Se RR No. 5.384A
2500-2690 MHz	Se RR No. 5.384A
3400-3600 MHz	Se RR Nos. 5.430A, 5.432A, 5.432B, 5.433 ^a

Tabell 2.4-1.: Frekvensspektrum identifisert for IMT-A, [3].

3. Valg av simuleringsverktøy

Dette kapitlet gir en kort oversikt over aktuelle simuleringsverktøyer som kan benyttes i mobilkommunikasjons sammenheng. Bakgrunnen for alternativ valg er også avgitt i dette kapitlet. En rekke nyttige verktøy er samlet og diskutert videre i de neste delkapitlene, nemlig JavaSim, NS2, OMNeT++, OPNET, NS3, Matlab, osv.

3.1. Simuleringsverktøys krav

Siden dette arbeidet dreier seg om linkbaserte simuleringer skal verktøy ha visse evner til å håndtere en rekke ulike funksjoner for radiokanal. En radiokanal-emulator er et element av testutstyr som implementeres i radioytelses- og samsvarstesting for å generere radiokanalresponsen mellom en sender og en motaker. Kanalemulatoren bør kunne støtte avanserte kanalmodelleringsevner over skalerbar båndbredde og justerbar bærefrekvens. Beamforming og prekodningsteknikker for eksempel krever kalibrering og nøyaktig faseskift mellom parallelle antenneelementer [18]. Eventuelle fasevinkel og ufullkomne amplitude forårsaker feil i spatial korrelasjon. På samme måte vil avanserte MIMO-moduser kreve flere tilbakemeldingskanaler med ulike synkroniseringskanaler. Dette for å muliggjøre emuleringen. PAPR (Peak-to-Average-Power Ratio) i OFDM-systemer er betydelig høyt, derfor er det nødvendig å benytte kanalemulatoren som er utstyrt med en bred og dynamisk skala. Merk at kanalemulatoren krever også linearitet for alle sine genererte signaler.

3.1.1. Simuleringsscenarier

Simuleringsverktøy bør håndtere parametere for både linkbaserte og systembaserte simuleringer. Alle kanalmodeller og de tilsvarende testmiljøene i tabell 2.1-1 kan kombineres for å utforme et eventuell simuleringsscenario. Kapittel 5 gir mer detaljer om dette.

3.1.2. Anbefaling fra fagmiljø

Det er fundamentalt avgjørende å velge ut riktige simuleringsomgivelser for slike oppgaver. Fra fagmiljø for eksempel Telenor fikk vi relevante anbefalinger baserte på egne brukeropplevelse angående de ulike simuleringsverktøyene. Utfallet etter flere samtaler var å velge mellom Matlab og OPNET. Den verdifulle innspill fra kontaktpersonen hos Telenor har i stor grad påvirket det endelige valget.

3.2. JavaSim

JavaSim eller J-Sim: Er en kryssplattform siden den er skrevet i Java. Verktøyet har en innebygd CSL (Core Service Layer) som inneholder fysisk-, datalink- og nettverkslag, dette er generelt sett en ”*packet switched network model*” eller ”*Internetworking Simulation Platform*” (INET). Man kan bygge opp moduler ved hjelp av Java, og den bruker TCL (Tool Command Language), som scriptspråk. J-Sim er gratis å bruke, den har også GUI som heter Graphical Editor. Det er nesten ingen aktivitet rundt J-Sim på nettet, og dette kan være ulempe på grunn av redusert anvendelse. Følgende tjenester realiseres i Core Service Layer: {{ (i) the data forwarding/delivery service, (ii) the identity service, (iii) the routing service, (iv) the interface/neighbor service, (v) the packet filter configuration service }}. J-Sim har også WE (Wireless Extension) med et sett av komponenter som utfører basale analyse av trådløse mobilnetverkssimuleringer. Wireless Extension introduserer tre radioforplantningsmodeller: *Free Space Model*, *Two Ray Ground Model* og *Irregular Terrain Model*. Det er ikke funnet noen relaterte informasjonen om andre modeller som Erceg, ITU eller lignende. Dette innebærer også ulempe ettersom de siste nevnte betraktes som referanse kanalmodeller for fremtidige mobile nettverkssystemer [35].

3.3. NS2

Nettverk Simulator (utgave 2) kjent for NS2 er et hendelsebaserte simuleringsverktøy som har vist seg nyttig i å undersøke dynamiske egenskaper for kommunikasjonsnettverker. Simulering over kablede og trådløse (Local og Satellite) nettverksfunksjoner og protokoller (for eksempel ruting algoritmer, TCP, UDP) kan utføres ved hjelp av NS2. NS2 tilbyr for brukere en måte å spesifisere slike nettverksprotokoller. Protokollene definerer den ettersøkte nettverksoppførselen. NS2 er egentlig et nettverksbaserte simuleringsverktøy [36].

3.4. OMNET++

OMNeT++, C++. En nyere utgave for Eclipsebaserte plattform. Den har en IDE (Integrated Development Environment), som kalles OMNeT++ 4.0 IDE – og dette er årsaken som førte til en vel utvidede editor, design og andre funksjonaliteter. Mobility Framework (MF) for OMNeT++ besørger blant annet simuleringer for trådløse mobilnettverk, men det ser ut at Framework ikke lenger blir vedlikeholdt siden 2006. *Uoppdateringen kan være en bakdel for moderne teknologier hvilke data kompleksitet krever mye av simuleringsomgivelse.* Simuleringsomgivelse er basert på DES (Discrete Event Simulation), med forutsetningen at datatilstanden skal holdes uforandret mellom to naboøvelser. OMNeT er egnet for nettverkssimuleringer, den er i hovedsak kommersiell. Den kommersielle utgaven kalles for OMNEST med blant annet (network simulation, discrete event simulation, embedding). Men OMNeT tilbyr likevel andre utgave med gratis lisens [37].

3.5. OPNET

Optimized Network Engineering Tools (OPNET) er i hovedsaken kommersielt [38]. Det finnes noe som kalles *University Program Products* som er den spesielle ordningen *Core Products* for universiteter. Det er derfor mulig å søke om en akademisk lisens gjennom *Teaching with OPNET* eller *Research with OPNET* ved å fylle inn et søknadsskjema som finnes på nett pluss noen prosedyrer. *OPNET Modeler® Wireless Suite* er modellen som støtter simuleringer for alle type mobilnettverker, inkludert (GSM, CDMA, UMTS, IEEE 802.16- WiMAX, LTE, osv). LTE og WiMAX er i utgangspunkt konsortietbaserte lisenser. For Universitetsutgaven krever OPNET av institusjoner at en fullstendig sluttrapport skal leveres på slutten av prosjekt. Og i tillegg er det forbudt å benytte studentutgaven for et kommersielle arbeid. Merk at OPNET kan etterkomme generelle krav for IEEE 802.16 kap.4, med unntak av MIMO eller avanserte antennteknikker. Den eneste konfigurasjonen OPNET støtter i dag er 2x1 (SIMO). Detaljene for IEEE802.16e-2005 finnes i den WiMAX spesifikke modellen.

3.6. Matlab og Simulink

Matlab kommer i to sortiment: Student og profesjonell utgaver. Simulink for disse utgavene har de samme ferdighetene. Med simulink kan man modellere, simulere, evaluere dynamiske systemer, behandle signal, benytte innebygd kommunikasjonsverktøy og mer. Det er ingen gratis lisens i utgangspunkt, men universiteter og høyskole institusjoner tilbyr dette for studenter. En kan arbeide lokalt på UiO og UniK eller hjemmefra via VPN nettverkssystem.

3.7. Simuleringsverktøy oversikt

Tabellen gir en oversiktlig oppsummering på bakgrunn av tre utvalgte egenskaper. *Brukbarhet* skal vektlegge hvor ofte et verktøy anvendes på linkbaserte simulasjoner. Når to eller flere teknologier skal sammenlignes ved hjelp av simuleringsresultater må dette foregå i samme plattform. Videre skal et simuleringsverktøy ha mindre innflytelse på resultater for å gjøre en rettferdig RITs vurdering. Det siste er vanskelighetsgraden eller brukerterskelnivå. En av de viktigste forutsetninger for et simuleringsverktøy er å henvise fornuftige resultater.

Egenskaper	J-Sim	NS2	OMNET ++	Opnet	Matlab
Brukbarhet	(- -)	(-)	(-)	(+)	(+ +)
Sammenligning mellom teknologier	**	**	**	(+ +)	(+)
Brukerterskel nivå	**	**	**	(+ +)	(+)

Tabell 3.7-1: ** informasjon ikke tilgjengelig, (-)/(-) mindre/ingen aktivitet hhv, (+)/(++) brukt eller normal/mye brukt eller høy hhv.

3.7.1. Konklusjon

Vurderingen om simuleringsverktøys valg er gjort mellom Matlab og OPNET. En ser umiddelbart på fordeler og egenskaper ved Matlab, spesielt i akademisk miljø der simulink er veldig populær, og hjelp kan lett fåes. På den andre siden har vi OPNET som er nesten ukjent ved universitetsmiljø, særlig UiO, men leverandøren har hele veien hevdet at OPNET var innebygget med ferdige simulasjonsmodeller for LTE og mobile WiMAX. Etter overveielse og en positiv innspill fra min veileder besluttet jeg å benytte OPNET Modeller.

4. WiMAX versus LTE

4.1. Introduksjon

WiMAX tilhører IEEE-standardfamilien og sikter til IEEE 802.16 standard. En sier at den er en forbedret utgave av WLAN (IEEE 802.11 std) på grunn av at den forlenger trådløssaksess til WAN- og MANnettverker. WiMAX er en telekommunikasjons teknologi som sørger for trådløs dataoverføring ved hjelp av en rekke sendemodus, fra Punkt-til-Punkt, PMP (Punkt-til-Multipunkt)-forbindelser til og med Internett mobilaksess. Teknologien leverer i dag opptil 72 Mbps symmetrisk datarate uten behov for kabler [4].

WiMAX Forumet beskriver denne databaserte teknologien som et alternativ for kabelbasert bredbånd og xDSL-familien i griseendte strøk (last mile).

Forumet besørger at alle sine sertifiserte profiler blir implementert etter WiMAX forum standardskrav slik at utstyr fra forskjellige leverandører kan brukes om hverandre [4].

På den andre siden, er 3GPP LTE et prosjekt av 3GPP-gruppe i den hensikt for å videreutvikle den gjeldende 3G (UMTS/HSPA) mobilteknologien til et nivå der kravene for høy datarate og spektral effektivitet sees oppfylte. Fokus i 3GPP LTE-prosjektet er å utvide Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) til E-UTRA, og optimalisere UTRA-Nettverk, [5]. Diskusjonen om LTE i denne avhandlingen er basert på 3GPP i sin utgave 8 (3GPP Release 8-2008). De neste delkapitlene dreier seg om detaljene rundt WiMAX og LTE teknologiene.

4.2. IEEE 802.16 og WiMAX

4.2.1. IEEE 802.16-2001

IEEE 802.16-gruppen ble dannet i 1998 for å utvikle radiogrensesnittstandard for trådløst bredbånd. Konsortiets opprinnelige fokus dreide seg om utviklingen av et Fri-sikt (LOS) basert punkt-til-punkt trådløst bredbåndsystem for arbeidsfrekvenser i (10 – 66) GHz. Den resulterende standarden – opprinnelig IEEE 802.16 standard, ferdigstilt i desember 2001 – var basert på enkeltbærefrekvens fysisk laget med MAC (Media Access Control)-lag basert på signalbunt (eng. Burst) tidsdelt multipleks (TDM).

4.2.2. IEEE 802.16-2004

Mange av begrepene knyttet til MAC-laget som var tilpasset det trådløse systemet kom fra den populære kabelmodemet DOCSIS (data over cable service interface specification) standarden. Senere ble 802.16a produsert av IEEE 802.16 gruppen, et tillegg til standarden for å inkludere ikke-fri-sikt applikasjoner (NLOS) i (2 – 11) GHz båndområdet ved å benytte et OFDM-basert fysisk lag. Addisjoner til MAC-laget, for eksempel støtte for OFDMA, ble også inkludert. Videre revisjoner i 2004 resulterte til en ny standard kalt IEEE 802.16d-2004 som erstattet alle tidligere versjoner, og dannet grunnlaget for første WiMAX løsning. Disse tidlige WiMAX løsninger basert på IEEE 802.16-2004 var rettet mot stasjonære applikasjoner, og vi vil referere til disse som fastnett WiMAX [6].

4.2.3. IEEE 802.16e-2005

I desember 2005 gjennomførte og godkjente IEEE-gruppen IEEE 802.16e-2005 standarden, som er en endring av IEEE 802.16-2004 std med støtte for mobilitet i tillegg. Standarden danner så grunnlaget for WiMAX løsning for fast, nomadisk og mobile applikasjoner i lisensierte frekvensbånd under 6 GHz, og blir ofte referert til som Mobile WiMAX [7]. Se grunnleggende egenskaper av forskjellige IEEE 802.16 standarder oppsummert i tabell 4.2-1. Merk at disse standardene tilbyr et utvalg av fundamentalt forskjellige designmuligheter. For eksempel er det flere fysiske lag å velge mellom: WirelessMAN-SCa er et enkeltbærer-basert fysisk lag; WirelessMAN-OFDM er et OFDM-basert fysisk lag; og WirelessMAN-OFDMA, er et OFDMA-basert fysisk lag. Likeledes er det flere valg for MAC arkitektur: dupleksering, arbeidsfrekvensbånd, modulasjonsmetoder med mer.

4.2.4. IEEE 802.16TM – 2009

Standarden er en revisjon av IEEE 802.16-2004 Std, og konsoliderer materiale fra IEEE Std 802.16e – 2005, IEEE 802.16-2004/Cor1-2005, IEEE 802.16f-2005 og IEEE Std 802.16g-2007, samt ekstra vedlikehold over elementer og forbedringer av informasjonshåndtering på basestasjoner, [8]. Denne revisjonen erstatter og forelder IEEE 802.16-2004 og alle senere endringer og Corrigenda.

Standard	802.16	802.16-2004	802.16e-2005	802.16-2009
Status (ferdigstilt)	Desember-2001	Juni-2004	Desember-2005	Mai-2009
Spektrum [GHz]	10G – 66	2 - 11	2 – 11(for fast); 2 – 6 (for mobile applikasjoner)	Konsolideringsmateriale fra alle foreldede IEEE 802.16-2004 og alle senere endringer og corrigenda. Dette er hovedreferansen for alle effekter.
Støttet tjenester	Fast LOS	Fast LOS, nomadisk	Fast og mobile NLOS	
MAC arkitektur	Punkt-til multipunkt, mesh	Punkt-til multipunkt, mesh	Punkt-til multipunkt, mesh	
Transmisjonsmetode	Enkelt bærefrekvens	Enkeltbærer, 256 OFDM or 2,048 OFDM	Enkeltbærer, 256 OFDM; eller skalerbar OFDM:128, 512, 1024, eller 2048 delbærere	
Modulasjons-Skjema	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	
Data rate [Mbps]	32 - 134.4	1 - 75	1 - 75	
Multipleksing	Burst TDM/TDMA	Burst TDM/TDMA/OFDMA	Burst TDM/TDMA/OFDMA	
Dupleksing	TDD / FDD	TDD / FDD	TDD / FDD	
Kanal båndbredde [MHz]	20, 25, 28	1.75, 3.5, 7, 14, 1.25, 5, 10, 15, 8.75	1.75, 3.5, 7, 14, 1.25, 5, 10, 15, 8.75	
radiogrensesnitt betegnelse	WirelessMAN-SC	WirelessMAN-SCa WirelessMAN-OFDM WirelessMAN-OFDMA WirelessHUMAN ^a	WirelessMAN-SCa WirelessMAN-OFDM WirelessMAN-OFDMA WirelessHUMAN ^a	

WiMAX implementasjon	-	256-OFDM som Fastnett WiMAX	Skalerbar OFDMA som Mobile WiMAX	
-------------------------	---	--------------------------------	-------------------------------------	--

Tabell 4.2-1: IEEE 802.16 Standarder grunnlagsdata [4].

4.2.5. Systemprofiler og sertifiseringsprofiler

Alle standardene listet over ble utviklet for å dekke en rekke ulike applikasjoner og deployeringsscenarier, og tilbyr dermed en overflod av designvalg for systemutviklere. Faktisk kunne man si at IEEE 802.16 er en samling av standarder, ikke én eneste interfunksjonsdyktig (interoperable) standard. Av praktiske interoperabilitetsgrunner, krever WiMAX forum redusert omfang av standarder. De skal administreres på en forsvarlig måte, også et mindre sett av utvalgt design eller gjennomføring må da defineres. WiMAX forumet gjør dette ved å definere et begrenset antall *systemprofiler* og *sertifiseringsprofiler*.

En systemprofil definerer undergruppe av obligatoriske og valgfrie fysiske- og MAC-lag funksjoner som WiMAX forum velger ut fra IEEE 802.16-2004 eller IEEE 802.16e-2005 std. Det bør bemerkes at de obligatoriske og valgfrie statuser for en bestemt funksjon innenfor en WiMAX systemprofil kan være forskjellige fra hva det er i den opprinnelige IEEE std. En systemprofil består av fem komponenter: En MAC profil, en PHY profil, en RF-profil, en Dupleks profil og en effekt klasse. Foreløpig har WiMAX forumet to forskjellige systemprofiler: en basert på IEEE 802.16-2004, OFDM PHY, kalt *fastnett systemprofilen*. Den andre er basert på IEEE 802.16e-2005 skalerbare OFDMA PHY, kalt *mobilitet systemprofilen*.

En Sertifiseringsprofil er definert som en bestemt opprettelse av en systemprofil der arbeidsfrekvens, kanalbandbredde og dupleksmodus er angitt. WiMAX utstyr er sertifisert for interoperabilitet mot en bestemt sertifiseringsprofil. WiMAX forumet har så langt definert fem fastnett sertifiseringsprofiler og 14 mobilitets sertifiseringsprofiler [4]. Til dags dato er det to fastnett WiMAX profiler mot hvilket utstyr som er sertifisert.

Med ferdigstillingen av 16e-2005 std, har interessen innenfor WiMAX-gruppen økt kraftig mot å utvikle og sertifisere Mobile WiMAX systemprofiler basert på IEEE 802.16e-2005 standarden. Alle Mobile WiMAX profiler benytter skalerbare OFDMA-baserte fysiske lag. I utgangspunktet vil alle mobilitetsprofiler benytte et punkt-til-multipunkt MAC-lag. Det bør også bemerkes at de fleste aktuelle kandidater for mobilitetssertifiseringsprofiler er TDD basert. Selv om TDD profiler ofte er å foretrekke, kan FDD profiler være et redskap for i fremtiden å overholde regelverket for paring og krav til interoperatørsameksistens i visse bånd.

4.2.6. Teknologiske karakteristikk – WiMAX egenskaper

WiMAX funksjon	Nytte hensyn
OFDM-basert fysisk lag	Gir god motstand mot flerveis utbredelse, og tillater WiMAX operere i NLOS (Non Line of Sight)
Adaptiv modulasjon og kodingskjemaer (AMC)	-Sendemodus endres på en per bruker og per ramme grunnlag, basert på kanalens tilstand. -Effektiv mekanisme for å maksimere gjennomstrømmingen i en tidsvarierende kanal. -Tilpasser bruk av de høyeste modulasjoner og kodingsmetoder som kan støttes av SNR/BLER forhold til mottakeren.
IP-basert arkitektur	-Alle ende-til-ende tjenester er IP-baserte protokoller som transport, QoS, sessionshåndtering, sikkerhet og mobilitet. -Enklere konvergens med andre nettverk og utnytter det rike økosystemet for utvikling av applikasjoner som finnes for IP.
Høye topp datarater	-Topp datarater oppnåes vba ¹ 64 QAM og 5/6 FEC koding. -For 10 MHz (BW ¹), TDD og 3:1(UL/DL), kan 25 Mbps oppnåes.
OFDMA-basert aksessteknikk	-Forskjellige brukere kan allokeres ulike undergrupper av OFDM toner. -OFDMA muliggjør utnyttelse av frekvens diversitet og flerbruker diversitet for en betydelig bedre system kapasitet.
Skalerbar båndbredde og datarate	-Fysiske lags arkitektur er skalerbar. Tillater data å skalere lett med tilgjengelige kanalbåndbredder. -Skaleringen kan gjøres dynamisk for å støtte brukerens roaming på tvers av forskjellige nettverk som kan ha forskjellig båndbredde allokeringer. -Skalerbarhet støttes i OFDMA modus gjennom å variere FFT størrelse basert på tilgjengelige kanalbåndbredder.
Link-lag nysending (retransmission)	-Tilkoblinger som krever bedre pålitelighet, støtter WiMAX automatisk videresending forespørsler (ARQ) på link-laget. -ARQ-aktiverte tilkoblinger krever ACK (Acknowledgement) av mottaker for hver overførte pakke, hvis en pakke ikke besvares antas den å være tapt, og må sendes på nytt. -WiMAX også støtter hybrid-ARQ som er en effektiv hybrid mellom FEC og ARQ.
Avanserte antenna teknikker	-Beamforming, Space Time Coding, Spatial multiplexing (MIMO). -Disse teknikkene kan brukes for å forbedre den totale systemkapasiteten og spektral effektivitet ved å bruke flere antenner på sender og/eller på mottaker side.
Støtte for mobilitet	-Den mobile WiMAX varianten av systemet har mekanismer for å støtte sikre, sømløse handover for forsinkelse tolerante full mobilitet, f.eks VoIP. -Systemet har også innebygd støtte for strømbesparende mekanismer som forlenger batteriets levetid på håndholdte enheter. -Fysiske lagforbedringer, f.eks frekvent kanalstimering, UL kanaldeling og strømfordeler (power control), er også spesifiserte i støtte for mobile applikasjoner.
Flere sendemoduser (TDD/FDD/H-FDD)	-TDD: (1)Fleksibilitet i valg av UL-til-DL dataratene forhold, (2)evne til å utnytte kanalens gjensidighet, (3) evne til å implementeres i ikke paret spektrum, (4) mindre komplekse transceiver design. -FDD og Half-FDD er mindre brukte, årsaken er knapp ressurser og kostbart å implementere.
Robust sikkerhet	-Støtter sterk kryptering, benytter AES (Advanced Encryption Standard), har robust privasitet og nøkkel-håndteringsprotokoll. -System tilbyr veldig fleksibelt autentisering arkitektur basert i EAP

	(Extensible Authentication Protocol): brukernavn/passord, digital sertifisering, og smart kort.
Servicekvalitet (QoS)	-IEEE 802.16 MAC-laget har en forbindelsesorientert arkitektur som er utviklet for å støtte en rekke ulike applikasjoner, b.a. tale og multimedia tjenester. -Systemet tilbyr støtte for konstant bitrater, variabel bitrater, i sanntid, og ikke-sanntid trafikkstrømme, i tillegg til BE data trafikk. -WiMAX MAC er laget for å støtte et bredt antall brukere, med flere tilkoblinger per terminal, hver med egne QoS-kraver.
Fleksibelt og dynamisk per bruker ressursallokering	-Både UL og DL ressursallokering er kontrollert av en kanalfordeler (scheduler) i BS. Capasitet deles mellom flere brukere på en etterspørsel (demand) basis, med et signalbunt TDM skjema. -Når OFDMA-PHY modus brukes, multipleksering er i tillegg gjort i frekvensdimensjon, ved å tildele forskjellige undergrupper av OFDM subtoner til ulike brukere. -Standarden tillater at BW-ressursene skal fordeles i tid, frekvens og i rom, og har en fleksibel mekanisme for å formidle ressursfordelingsinformasjon på en ramme-til-ramme basis.

Tabell 4.2-2: Trender for WiMAX systemer. ¹ vba: ved bruk av, BW: Bandwidth, QoS: Quality of Service.

4.2.7. WiMAX Fysisk lag

Dette er det laveste laget (i OSI modellen) i et kommunikasjonssystem og er ansvarlig for konvertering av en bitstrøm fra høyere lag inn i signaler som kan overføres på senders side. Det fysiske laget på mottakers side omdanner signalet tilbake til bitstrømform som videre sendes til høyere lag i et system. I trådløs kommunikasjon er det fysiske laget ansvarlig for utvalg av frekvensbånd, generering av bærefrekvenser, signal deteksjon, datamodulasjon og kryptering (avhengig av senderskjema).

WiMAX' fysiske lag er basert på IEEE 802.16TM -2009 Std, og ble utformet med stor innflytelse fra Wi-Fi, særlig IEEE 802.11a. Selv om mange aspekter av de to teknologiene er forskjellige på grunn av ulikhet i deres formål og applikasjoner, er noen av deres grunnleggende oppbygginger svært like. I likhet med Wi-Fi, er WiMAX er basert på OFDM-prinsippene, som er en passende modulasjon/aksess teknikk for ikke-fri-sikt (NLOS) forhold og gir høye datarater. IEEE 802.16 std-familien har 5 fysiske lag definert:

WirelessMAN SC: et enkeltbærer fysisk lag, beregnet for frekvenser over 11GHz, krever LOS forutsetninger. Dette PHY laget er en del av de opprinnelige IEEE 802.16 spesifikasjonene.

WirelessMAN SCa: et enkeltbærer (single carrier) PHY lag for frekvenser mellom 2GHz – 11GHz for punkt-til-multipunkt virkemåte.

WirelessMAN OFDM: et 256-punkts FFT-basert OFDM PHY lag for punkt-til-multipunkt operasjoner i ikke-fri-sikt (NLOS) forhold ved frekvenser mellom 2GHz – 11GHz. Dette PHY laget ble fullført i IEEE 802.16.2004 spesifikasjonen, og har blitt akseptert av WiMAX for fastnett-virkemåte og blir ofte referert til som fastnett-WiMAX PHY lag.

WirelessMAN OFDMA: med 2048-punkters FFT-basert OFDMA PHY lag for punkt-til-multipunkt operasjoner i NLOS forhold ved frekvenser mellom 2GHz – 11GHz. Innenfor

IEEE 802.16e-2005 spesifikasjoner, har dette PHY laget blitt endret til Skalerbar OFDMA (SOFDMA) der antall FFT punkter er variabelt (128, 512, 1024, 2048). Varierende FFT størrelse gir mulighet for optimal drift/implementering av systemet over et bredt spekter av kanaler og radiobåndbredde forhold. Dette fysiske laget har blitt akseptert av WiMAX for mobile og bærbar operasjoner og er også referert til som Mobile WiMAX PHY lag.

WirelessHUMAN: ligner OFDM-PHY laget, men forpliktes dynamisk frekvens utvalg for lisens-fritt bånd, altså under 11GHz.

4.2.7.1. Implementering av WiMAX OFDM Fysisk lag

Det er nevnt tidligere at fastnett- og mobilnett-WiMAX utgavene implementerer det OFDM fysiske laget på forskjellig måter. Fastnett WiMAX, som er basert på foreldet IEEE 802.16-2004, benytter 256 FFT-basert OFDM fysisk lag. Mobilnett WiMAX, som er basert på foreldet IEEE 802.16e-2005 std, benytter seg av skalerbar OFDMA-basert fysisk lag. Når det gjelder mobile WiMAX kan FFT-størrelse variere fra 128 til og med 2048 prøvepunkter. Tabell 4.2-3 viser OFDM-relaterte parametere for både OFDM PHY og OFDMA PHY.

Parametere	Fast WiMAX OFDM PHY	Mobile WiMAX Skalerbar OFDMA PHY			
		Delbærere distribusjon basert på PUSC for nedlink			
FFT størrelse	256	128	512	1024	2048
Antall brukt data delbærere	192	72	360	720	1440
Antall pilot delbærere	8	12	60	120	240
Antall null/Sikkerhetsbånd delbærere	56	44	92	184	368
Syklisk prefix (CP) eller Sikkerhetstid (T _g /T _u)	1/32, 1/16, 1/8, 1/4				
Oversamplings rate (F _s /BW)	Se Tabell 4.2-5	Avhengig av BW: 8/7 for multippel av 1.75 MHz, og 28/25 for multippel av 1.25 MHz, 1.5 MHz, 2 MHz eller 2.75 MHz; Og 8/7 for kanalbåndbredde ikke spesifisert			
Kanalbåndbredde (MHz)	3.5	1.25	5	10	20
Delbærere-mellomrommet (kHz)	15.625	10.9375			
nyttig symboltid (μs)	64	91.429			
Sikkerhetstid antagelse eller (CP) 12.5% (μs)	8	11.4286			
OFDM symbolperiode (μs)	72	102.857			
Antall OFDM symboler i 5 ms radoramme	69	48			

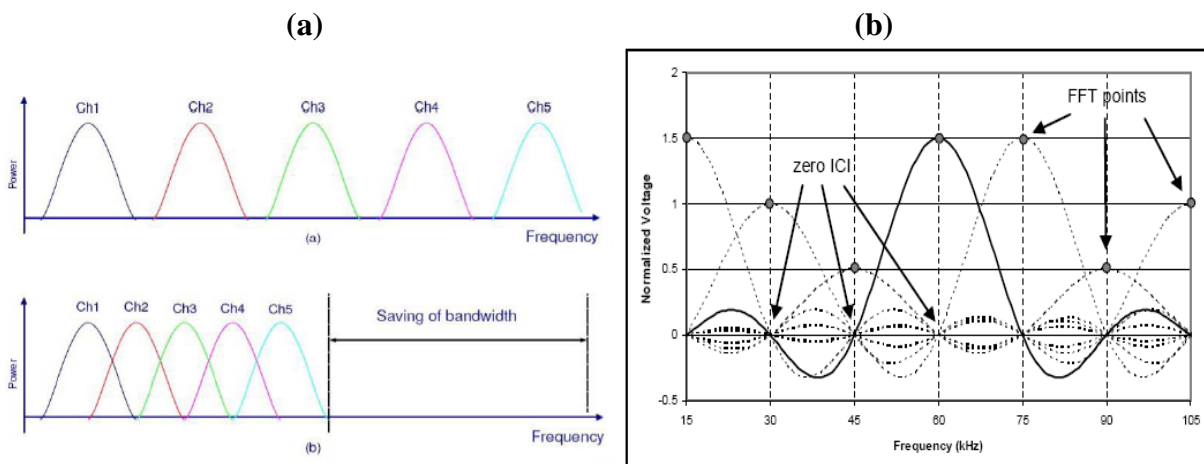
Tabell 4.2-3: Opplink OFDM parametere i WiMAX systemer [4].

Merk at mobil WiMAX opplink har forskjellig PUSC oppsetting, dette illustreres i kapitlene nedenfor.

4.2.7.2. OFDM prinsipper

OFDM er en teknologi utviklet ved Bell Labs på 1960-tallet [39]. Det er imidlertid kun i de siste årene den har blitt tatt i bruk.

Når en benytter høye frekvenser, over 11GHz, er en avhengig av fri-sikt. Dersom det er hindringer i form av bygninger eller trær, vil signalet svekkes betydelig. Signaler med lavere frekvenser, nemlig under 11GHz, har derimot evner til å gå rundt eller trenge gjennom hindringer [6]. Tapene som oppstår på grunn av hindringer blir mindre og mindre etter hvert som frekvensen går ned. Lavere frekvenser medfører en rekke reflekterte kopier av signaler hos mottakeren, og det kalles flerveistransmisjon (på engelsk: multipath propagation). OFDM drar så nytte av fenomener som oppstår ved lavere frekvenser, særlig i NLOS forhold. MCM (Multicarrier Modulation) for eksempel FDM bruker sikkerhetsbånd (guard band) mellom delbærere for å eliminere eller redusere Inter-Symbol-Interferens og gi fritt rom for gjennvinning av signalene hos mottakeren (fig.4.2-1). FDM er ikke så spektrumseffektivt på grunn av sikkerhetsbånd som sløser en god del av kanalbredde og effekt. Idéen i OFDM er litt forskjellig fra MCM. I OFDM er delbærefrekvenser plassert på en slik måte at de er ortogonale for hverandre. Dermed er Inter Carrier Interference (ICI) redusert og den tilgjengelige båndbredden benyttes mer effektivt.



Figur 4.2-1: Konvensjonell FDM vs OFDM. (a) illustrerer kanalbreddesløsning ved FDM og hvordan ortogonalitet kommer godt med i OFDM [32]. (b) viser ortogonaliteten over flere OFDM delbærere i en symbolperiode Δf , i frekvensdomenet [13].

I OFDM er individuelle delbærere ortogonale i forhold til hverandre. Dette oppnår man ved at hver delbærer er helt antall ganger symbolraten til de modulerte symbolene, og hver delbærebølge har en innbyrdes avstand som tilsvarer symbolraten.

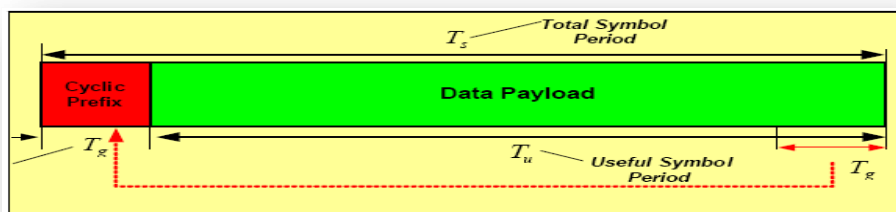
Data som tilføres systemet blir først konvertert fra seriell til parallell datastrøm. Dersom det er N delbærebølger blir datastrømmen delt opp i N parallelle sett av datastrømmer. Antall sett av datastrømmer avhenger av hvilken modulasjonstype som blir benyttet. Dersom 64-QAM benyttes, vil det komme ut av en S/P konverter 64 parallelle datastrømmer, hvor seks biter i hver symbolperiode tilsvarer en verdi i 64-QAM modulasjonssystemet. Hver av 64 datastrømmer skal således modulere en separat delbærebølge. Hver delbærebølge inneholder kun en liten del av den totale datamengden, og dekker på tilsvarende måte en liten del av kanalbredden. OFDM symbolet kan representeres i tid- og frekvensdomener.

4.2.7.3. WirelessMAN OFDM fysisk lag

Det er referert over at fastnett WiMAX fysiske lag har en fast 256 FFT-størrelse. Siden FFT er fast, bør delbærere-mellomrommet (Δf) variere med kanalbåndbredde. Når båndbredde går opp, vil Δf øke. Dette reduserer symbollengde i forhold til Δf . Ved å minske symbollengde innebærer allokering av større sikkerhetsbånd (CP) for å overvinne spreds forsinkelse eller Intersymbol Interference (ISI). Tabell 4.2-3 viser en rekke sikkerhetsbånd som tillater systemdesignere å gjøre nødvendige avveininger (trade-offs) mellom spektral effektivitet og spreds forsinkelsesrobusthet. For maksimal spreds forsinkelsesrobusthet kan 25 % CP-tid benyttes. Dette tilpasser spreds forsinkelse opp til 16 μs når kanalbåndbredden i systemet er på 3.5 MHz, og opp til 8 μs når kanalbåndbredden er på 7 MHz. I relativt godartet flerveis utbredelse kan ekstra informasjon reduseres til omlag 3 % [4].

4.2.7.3.1. OFDM Symbol i tidsdomene

Inverse-Fourier-Transformert (IFFT) genererer OFDM-kurveformet signal, varighet av dette signalet er referert til som nyttig symboltid, T_u . En kopi av den siste sikkerhetsintervall (guard time, T_g) på den nyttige symboltida, kalt CP, brukes til å fange opp multipath, og samtidig opprettholde ortogonalitet av toner. Figur 4.2-2 illustrerer strukturen. Syklisk Prefiks eller CP kan legges i begynnelsen av OFDM-symbol før overføring. Forholdet mellom sikkerhetstid og nyttig symboltid, T_g/T_u , er kjent som forholds faktor (G). Valget av G avhenger av radiokanalens forhold. Transmisjonsenergi øker med lengden av sikkerhetsintervall (T_g) mens energien på mottakers side forblir den samme (det sykliske prefikset forkastes før selve OFDM signalbehandling), så det er noen E_b/N_0 tap i dB [6] §8.4. CPs ekstraplassbehov og resulterende SNR-tap kan reduseres ved å øke FFT-punkter, noe som ville likevel påvirke følsomheten for fase-oscilator støy til systemet [6]. Ved hjelp av en syklisk forlengelse kan punktprøver som kreves for å utføre FFT-algoritme tas hvor som helst over lengden av det tilsynelatende utvidede symbolet på mottakeren. Dette gir flerveis utbredelse immunitet samt toleranse for symbols synkroniseringsfeil i tid.



Figur 4.2-2: OFDM-symbol i tidsdomene og syklisk prefiks, CP, [9].

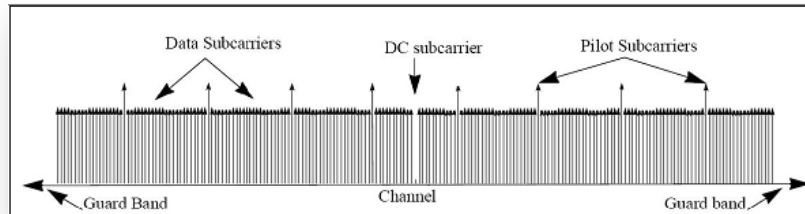
4.2.7.3.2. OFDM Symbol i frekvensdomene

Beskrivelsen av frekvensdomenet omfatter grunnleggende struktur i et OFDM-symbol. Et OFDM-symbol består av delbærere som bestemmer antall FFT-punkter som benyttes i et system. Tre typer delbærere er definert:

Data delbærere: benyttet for dataoverføring

Pilot delbærere: benyttet for ulike estimeringsformål

Null delbærere: ingen overføring brukt for DC-delbærere, sikkerhetsbånd og ikke-aktive delbærere i det hele tatt. DC-delbærere er ikke modulert for å forhindre metningseffekter eller overflødig strømforbruk på forsterker. Ingen strøm er allokert til sikkerhetsbånd mot randen av spektrum for å tilpasse spekteret av OFDM-symbol innenfor tildelt båndbredde og dermed redusere interferens mellom nabokanaler. Se figur 4.2-3 for illustrasjon.



Figur 4.2-3: OFDM-symbol i frekvensdomene.

4.2.7.3.3. Fordeler og ulemper ved OFDM

Fordeler ved OFDM [4]:

Redusert regnekompleksitet: OFDM kan bli enkel å implementere ved bruk av FFT/IFFT-algoritme. Kompleksitet er gitt ved: $O(B \log BT_m)$ der B står for båndbredde og T_m er spredningsforsinkelse. Dette er lavere enn $O(B^2 T_m)$ for standard utjevnerbasert systemer.

Brukt som multiaksess metode: OFDM kan benyttes som en multiaksess metode, hvor ulike toner er delt mellom flere brukere. Denne aksessmetoden kalles OFDMA og benyttes i Mobile WiMAX. Aksessmetoden muliggjør også granulering i kanaldeling. I en langsom tidsvarierende kanal, er det mulig i stor grad å øke kapasiteten ved å tilpasse dataene per abonnent i henhold til SNR målt over den aktuelle delbæreren. Det vil si at med OFDM kan hver delbærer moduleres av ulike moduleringssteknikker eksempelvis BPSK, QPSK og M-QAM.

Kontrollert ytelsesreduksjon under overflødig forsinkelse: Ytelsen i et OFDM-system faller moderat hvis spredningsforsinkelsen overstiger verdien systemet er bygget for.

Robust mot smalbandsinterferens: OFDM er relativt robust mot smalbandsinterferens. I slik interferens blir kun en del av delbærerne påvirket.

Egnet for koherent demodulasjon: det er relativt enkelt å gjøre pilotbasert kanalestimering i OFDM-systemer, som gjør dem egnet for koherent demoduleringsmetode. Koherente metoder er mer energieffektive.

Utnyttelse av frekvensdiversitet: OFDM forenkler koding og interleaving på tvers av delbærere i frekvensdomenet, noe som kan gi motstandsdyktighet mot feil som følge av signalbunt (eng. burst) forårsaket av noen deler på det overførte spekteret som gjennomgår dyp fading. WiMAX definerer permutasjonsteknikker for delbærere som tillater at systemer utnytter diversitet i frekvens.

Ulemper ved OFDM:

OFDM er følsom overfor fase-oscilator støy som er skarp ved høyere frekvenser. Dette kan modelleres/begrenses ved hjelp av systemdesign.

OFDM har høy PAPR (Peak-to-Average-Power Ratio) som forårsaker ulineariteter og klippingsforvrengning. Dette kan føre til energiineffektivitet som må bekjempes.

Følsom for timing og frekvensoffset [4].

4.2.7.3.4. OFDM symbol parametere

OFDM symbolet er definert med fire grunnleggende parametere som kalles primitive, og sju deriverte parametere som karakteriserer OFDM symbolet. De derivative parameterne er avledet fra de primitive [6].

Primitive parametere	
Båndbredde, BW	Dette er den normale kanalbandbredden.
N_{brukt}	Antall brukte delbærere: (data + pilot)
Samplingsfaktor, n	Denne parameteren, sammen med BW og N_{brukt} bestemmer to andre parametere delbærers mellomrom, og den nyttige symbolperioden. Standardiserte verdier av denne parameteren er spesifisert i Tabell 4.2-5
Forholdsfaktor, G	Dette er forholdet av CP-lengde delt i den nyttige symbolperioden. Nødvendige verdier av denne parameteren er spesifisert i Tabell 4.2-5
Deriverte parameter	
N_{FFT}	Definert som den minste potens i andre som er større enn antall N_{brukt} .
Sampling Frekvens, F_s	$F_s = \text{floor} (n \cdot BW / 8000) \times 8000$.
Delbærere mellomrom, Δf	$\Delta f = F_s / N_{\text{FFT}}$
Nyttige symboltid, T_u	$T_u = 1 / \Delta f$
CP-lengde, T_g	$T_g = G \cdot T_u$
OFDM symboltid, T_s	$T_s = T_u + T_g$
Samplingstid, T_{samp}	T_u / N_{FFT}

Tabell 4.2-4: Primitive og Deriverte OFDM-symbols parametere. Flg forholdet kan også brukes: $T_u = (N_{\text{FFT}} + T_g) / T_{\text{samp}}$, [31].

Mulige verdier av: "G" og "n"	
G	1/32, 1/16, 1/8, og 1/4
Samplingsfaktor, n	For kanalbandbredder som er en multiplum av: 1.75 MHz gir $n = 8/7$. 1.5 MHz gir $n = 86/75$ 1.25 MHz gir $n = 144/125$ 2.75 MHz gir $n = 316/275$ 2.0 MHz gir $n = 57/50$. - For kanalbandbredder ellers ikke spesifisert over er: $n = 8/7$.

Tabell 4.2-5: Oversamplingfaktor n, og G-forholdsfaktor, ([6], table 248).

4.2.7.4. WirelessMAN OFDMA fysiske laget

Dette er Mobile WiMAX fysiske laget. Her er FFT-størrelse skalerbare fra 128 til 2048. Når den tilgjengelige båndbredden øker, vil også FFT-punkter øke slik at delbærebølge mellomrom skal holdes på 10.94 kHz. Dette holder varigheten av OFDM-symbolet fast - den viktigste ressursenheten - og derved muliggjøres at skalering gir minst mulig innvirkning på høyere lag. Et skalerbar design holder også kostnadene lave. Delbærer-mellomrommet på 10.94 kHz ble valgt med tanke på en god balanse mellom å tilfredsstillere spredningsforsinkelsen og doppler spred operasjonskrav til blandede fastnett- og mobilnettmiljø. Et delbærer-mellomrom på 10.94 kHz innebærer at 128, 512, 1024 og 2048 FFT benyttes når kanalbåndbredde er 1.25, 5, 10 og 20 MHz henholdsvis. Det er likevel viktig å merke at Mobile WiMAX vil også bruke 7 MHz og 8.75 MHz kanalbåndbredder med 1024 FFT. Dette vil åpenbart kreve andre delbærer-mellomrom verdier (se tabell 4.3-1) og dermed forskjellige skaleringsegenskaper. Det OFDMA-baserte fysiske laget gjør det mulig for en mobilstasjon (MS) å implementere skanning og søkingsmekanismer for å kunne oppdage nedlink-signal når den utfører initial nettverksentré. Dette kan inkludere en basestasjons dynamiske deteksjon av FFT-størrelse og benyttet kanalbåndbredde [8].

4.2.7.4.1. OFDMA symbol i tidsdomene

OFDMAs beskrivelse og struktur for symbolet i tidsdomenet er den samme som for OFDM.

4.2.7.4.2. OFDMA symbol i frekvensdomene

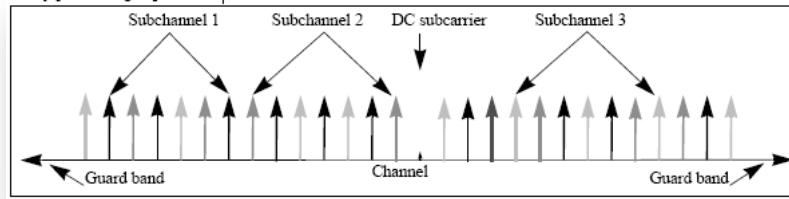
Beskrivelsen av frekvensdomenet omfatter grunnleggende strukturer i et OFDMA-symbol. OFDMA-symbolet består av delbærere og disse bestemmer hvilken type av FFT-størrelse som brukes. Det er tre hovedtyper delbærere:

Data delbærere: for dataoverføring

Pilot delbærere: for ulike estimeringsformål.

Null bærere: ingen overføring i det hele tatt, de er benyttet for sikkerhetsbånd og DC-mellombærere. Formålet med sikkerhetsbånd er å sette signalet i stand til eller å late som om det er en naturlig demping, og skape FFT- "teglsteinsmur" forming.

I OFDMA-modus er aktive delbærere (for data og pilot) delt inn i undergrupper av delbærere, hver undergruppe kalles delkanal eller underkanal (eng. Subchannel). WiMAX OFDMA PHY støtter kanaldeling i både DL og UL. Den minste frekvenstid ressursenheten av kanaldeling er en tidsluke som inneholder 48-data toner (delbærere). I nedlink kan en delkanal allokeres til ulike mottakere (eller grupper); i opplink kan en sender bli tildelt én eller flere delkanaler, og flere sendere kan overføre samtidig. Delbærebølgene som danner en delkanal kan - men trenger ikke - være tilstøtende. Konseptet er vist i figur 4.2-4. OFDMA-symbolet er delt inn i logiske delkanaler for å støtte funksjoner som skalerbarhet, multipel aksess og avansert antennegruppe (eng. antenna array) behandlingsevner.



Figur 4.2-4: OFDMA-Symbol og delkanaler i frekvensdomenet. Figuren viser et skjematisk eksempel med tre delkanaler, en DC delbærer og to sikkerhetsbånd ([8], fig.218).

Deriverte og primitive parametere for OFDMA har de samme definisjonene som for OFDM - modus. Dermed gjelder tabell 4.2-4 og tabell 4.2-5 også i OFDMA tilfellet.

4.2.7.4.3. OFDMA - allokering av delbærere

For OFDMA, er F_s (samplingsfrekvens) gitt av formelen i tabell 4.2-4. Antall delbærere benyttet (N_{brukt}) kan beregnes ved å trekke sikkerhetstoner (guard tones) fra FFT-størrelse (N_{FFT}). For både UL og DL er N_{brukt} allokerede gitt av summen mellom pilotdelbærere og datadelbærere. Men oppsetting av disse i DL og UL er forskjellig, avhengig av ulike mulige soner. For FUSC og PUSC i DL er aktive delbærere allokeret slik: pilottoner allokeres først, det som gjenstår er datadelbærere som er delt inn i delkanaler som benyttes eksklusivt for data (se figur 4.2-3). For PUSC i UL blir et sett av brukte delbærere delt først i delkanaler, og deretter er pilotdelbærere fordelt innenfra hver delkanal.

Generelt har FUSC et sett av felles pilottoner. PUSC i DL har for hver stor gruppe et eget sett med pilottoner. Mens PUSC i UL inneholder hver delkanal sitt eget sett med pilotdelbærere.

a) Nedlink (DL)

Nedlink kan deles inn i tre segmentstrukturer. Overføringen starter med en preamble. Det vil si at det første symbolet på DL-overføringen er preambelen. For hver FFT-størrelse, er tre forskjellige preambler definert, disse skiller seg fra delbærers allokeringmodus.

Symbol struktur for PUSC i nedlink

OFDMAs symbolstruktur er bygd av piloter, data og null-delbærere. Symbolet er først delt inn i grunnleggende cluster der null-bærere også er allokeret. Deretter allokeres piloter og datadelbærere innenfor hver cluster. Tabellen nedenfor illustrerer ideen.

Parametere	Verdi				Kommentar
	128-FFT	512-FFT	1024-FFT	2048-FFT	
Antall DC delbærere	1	1	1	1	Indeks 1024 (fra 0)
Antall sikkerhetsbånd delbærere, Venstre	22	46	92	184	
Antall sikkerhetsbånd delbærere, Høyre	21	45	91	183	
Antall brukte delbærere (N_{used})	85	421	841	1681	Antall delbærere brukt innen et symbol, inkluderer alle mulige allokerede piloter og DC delbærere.
Antall delbærere per cluster	14	14	14	14	
Antall clusters	6	30	60	120	
Antall data delbærere i hvert symbol per delkanal	24	24	24	24	
Antall delkanaler	3	15	30	60	
Basisk permutasjons sekvens YY (for YY delkanaler)	-	PermB-5: 4,2,3,1,0	PermB-6 3,2,0,4,5,1	PermB-12 -	For PermB-12 6,9,4,8,10,11,5,2,7,3,1,0
Basisk permutasjons sekvens XX (for XX delkanaler)	-	-	PermB-4 3,0,2,1	PermB-8: (se til høyre)	7, 4, 0, 2, 1, 5, 3, 6

Tabell 4.2-6 : OFDMA DL allokering av delbærere med PUSC etter N_{FFT} , ([8], s.938).

b) OFDMA symbol struktur for PUSC (UL)

En tidsluke i UL er sammensatt av tre OFDMA-symboler og en delkanal. Innen tidsluka, er det 48 datadelbærere og 24 piloter som vist i tabell 4.2-7. Delkanalen er konstruert av seks UL "Tiles". Hver "tile" har fire påløpende aktive delbærere. Hver sending bruker 48 databærere som minimal blokk av prosessering.

Parametere	Verdi				Kommentar
	128-FFT	512-FFT	1024-FFT	2048-FFT	
Antall DC delbærere	1	1	1	1	Indeks 1024 (for 2048) Indeks 512 (for 1024) Indeks 256 (for 512) Indeks 64 (for 128)
Antall sikkerhetsbånd delbærere, Venstre	16	52	92	184	
Antall sikkerhetsbånd delbærere, Høyre	15	51	91	183	
Permutasjons Base	PermB-0 2,0,3,1	-	-	-	

Antall brukt delbærer (N_{used})	97	409	841	1681	Antall delbærere brukt innen et symbol, inkluderer alle mulige allokerede piloter og DC delbærere.
Antall tiles	24	102	210	420	
Antall delbærere / tile	4	4	4	4	
Antall Tiles per delkanal	6	6	6	6	
Antall delkanaler	4	17	35	70	

Tabell 4.2-7: OFDMA UL allokering av delbærere med PUSC etter N_{FFT} , ([8], s.938).

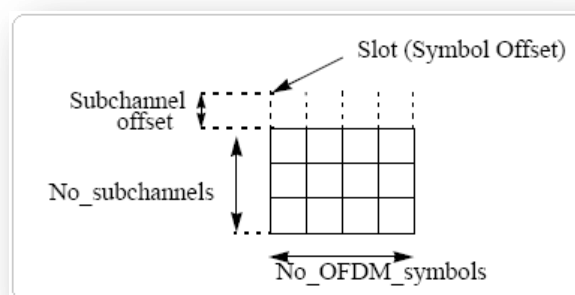
4.2.7.4.4. OFDMA basiske betegnelser - definisjon

Tidsluke og dataområde

En tidsluke i OFDMA PHY krever for fullstendighet to dimensjoner avgitt både i tid og delkanal, og er den minste mulige dataallokeringsenheten. Definisjonen av OFDMA-tidsluka avhenger av OFDMAs symbolstruktur, som varierer etter UL og DL, FUSC og PUSC, distribuerte eller tilstøtende delbærerpermutasjoner.

- For DL FUSC og DL valgfritt FUSC: en tidsluke tilsvarende én delkanal med ett OFDMA-symbol.
- For DL PUSC: er én tidsluke tilsvarende én delkanal av to OFDMA symboler.
- For UL PUSC, DL TUSC1 og TUSC2: en tidsluke tilsvarende én delkanal av tre OFDMA-symboler.
- For tilstøtende delbærerpermutasjon: en tidsluke tilsvarende én delkanal med to, tre eller seks OFDMA-symboler.

I OFDMA er et data område to-dimensjonalt allokeret av en tilstøtende delkanal gruppe, i en gruppe formet av tilstøtende OFDMA-symboler [8]. Alle allokeringer refereres til logiske delkanaler. Se figur 4.2-5 som viser et rektangulært eksempel med fire symboler \times tre delbærere.



Figur 4.2-5: Eksempel på dataområde som definerer en OFDMA-allokering, ([8] fig.219).

Segment

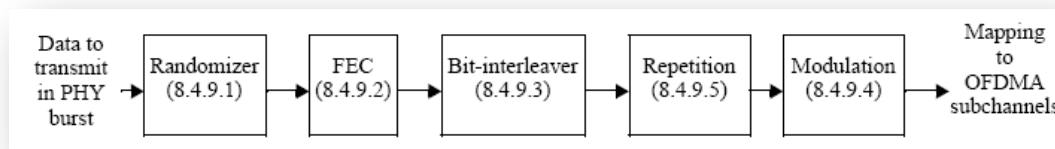
Et segment er en subdivisjon over et sett av OFDMA-delkanaler (subdivisjon kan inkludere alle tilgjengelige delkanaler). Segmentet benyttes for distribusjon av en enkelt MAC-instans.

Permutasjonssone

Permutasjonssonen er en rekke av tilstøtende OFDMA-symboler i DL eller UL som bruker samme permutasjonsformel. Nedlink (DL)-delrammen eller opplink (UL)-delrammen kan inneholde mer enn én permutasjonssone.

OFDMA dataavbildning (mapping)

Data i MAC-lag skal behandles av enheter som vist på figur 4.2-6, og skal avbildes til et OFDMA-dataområde for DL og UL ved hjelp av MAC-algoritmer.



Figur 4.2-6: Kanalkodingsprosess for transmisjon av regulær- og repetisjonskoding [8].

4.2.7.4.5. Tidsluke og Ramme struktur

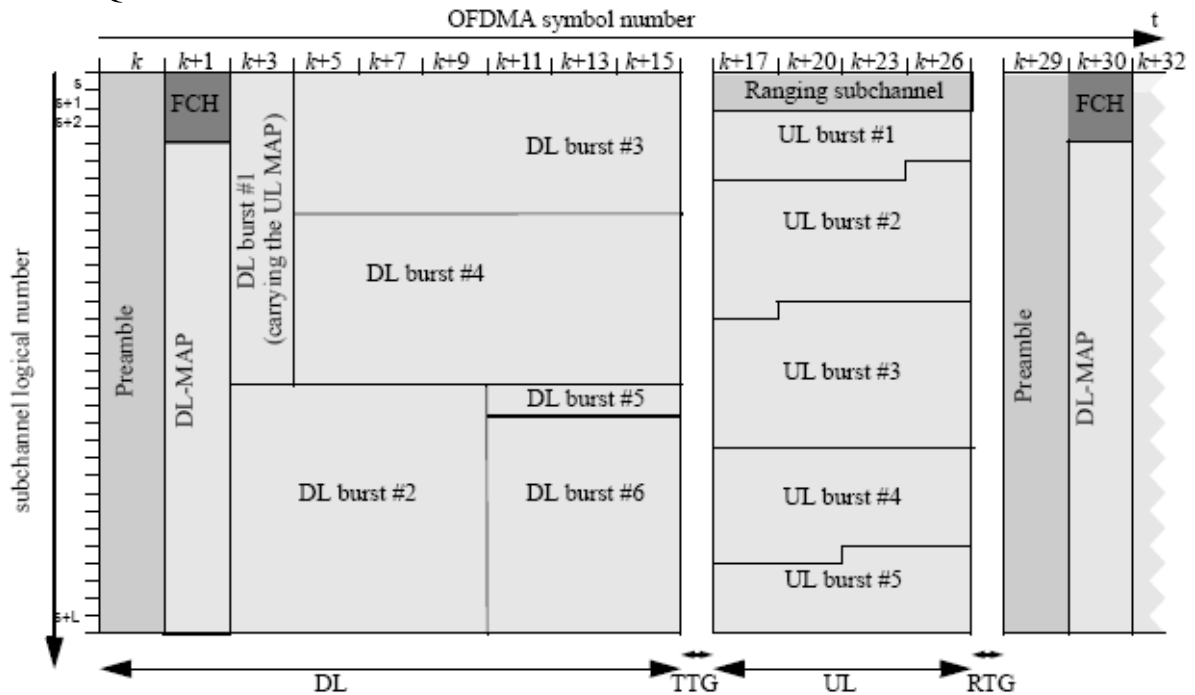
WiMAX' fysiske lag er også ansvarlig for tidslukeallokering og utforming av datasignal som sendes ut i fritt-rommet. Den minimale tidsfrekvensressursen som kan allokeres av et WiMAX-system til en gitt link kalles *tidsluke*. Hver tidsluke består av en delkanal over ett, to eller tre OFDM-symboler, avhengig av hvilke bestemte kanaldelingsmodeller som benyttes. En sammenhengende rekke av tidsluker tilordnet en gitt bruker kalles dets brukers dataområde (eng. *Data region*); scheduling eller kanalfordelingsalgoritmer kunne allokere dataregioner til ulike brukere basert på etterspørsel, QoS krav og kanalforhold.

Figur 4.2-7 viser OFDMA-rammen når systemet opererer i TDD-modus. Radiorammen er delt i nedlink delramme og opplink delramme. En sikkerhetsintervall (eng.: guard time) er plassert mellom dem. Nedlink-til-opplink delrammer forholds faktor kan variere fra (3:1) til (1:1) for å støtte ulike trafikkprofiler. WiMAX støtter også FDD-modus. Da er rammestrukturen den samme, bortsett fra at både opplink og nedlink overføres samtidig over ulike bærere. Noen av aktuelle fastnett WiMAX-systemer bruker FDD. De fleste er likevel trolig i TDD.

TDD gir en mer fleksibel deling av båndbredde mellom opplink og nedlink, krever ikke parett spektrum, har en gjensidig kanal som kan utnyttes for romlig behandling (eng. Spatial processing) og har et enklere transceiverdesign. Ulempen med TDD er behovet for synkronisering på tvers av flere basestasjoner (BS) for å sikre interferensfri sameksistens. Parettbånd regelverk og interoperatørproblematikk ved sameksistens, kan likevel tvinge enkelte operatører til å satse på WiMAX i FDD-modus.

Som vist i figur 4.2-7, begynner DL-delrammen med en *nedlink preamble* som benyttes for fysiske lags prosedyrer, som for eksempel tids- og frekvenssynkronisering og initialisering av kanalestimering. Nedlink preambleen er etterfulgt av en ramme-styringsinformasjon (eng. Frame control header, FCH), som bærer informasjon om rammekonfigurasjon, for eksempel

MAP-meldingslengde, modulasjon og koding, delkanaler osv. Dataregioner allokeres til flere brukere innenfor DL- og UL-delrammer. Informasjon om dette og annen styringsinformasjon er spesifisert i henholdsvis DL-MAP og UL-MAP. UL Ranging delkanal er allokeret for mobile stasjoner for å utføre lukket sløyfe tid, frekvens og effektjustering samt båndbredde forespørsel. UL CQICH-kanalen er allokeret for MS som benytter kanalen for sending av informasjon om kanalstatus til basestasjonen. UL ACK er allokeret for MS tilbakemelding om DL HARQ ACK.



Figur 4.2-7: OFDMA-ramme i TDD-modus (kun obligatoriske felter er vist) [8].

MAP-meldinger inkluderer signalbunt (eng. Burst)-profiler for hver bruker, den definerer modulasjon og kodingsmetoder som brukes i denne linken. Siden MAP inneholder viktig informasjon som skal nå alle brukere, brukes ofte en veldig pålitelig link, for eksempel BPSK med rate 1/2 koding og repetisjonskoding. Selv om MAP-meldinger er en elegant måte for basestasjoner å informere de ulike brukerne om sine allokeringer og signalbunt (burst)-profiler på et per-ramme grunnlag, kan det dannes en betydelig overhead, særlig når det er et stort antall brukere med små pakker (f.eks VoIP) for hvilke allokeringer må spesifiseres. For å redusere overhead-dilemma, kan mobile WiMAX-systemer eventuelt bruke flere sub-MAP meldinger der dedikerte meldinger for kontroll til andre brukere er overført til høyere rater, basert på deres individuelle SINR forhold. Kringkasting av MAP-meldinger kan også eventuelt bli komprimert for ekstra effektivitet.

4.2.7.4.6. Rammelengde

WiMAX er ganske fleksibel med hensyn til hvordan flere brukere og pakker er multiplekseret i en ramme. En enkelt nedlink delramme kan inneholde mange pakker med varierende størrelse og type databærere for flere brukere. Rammestørrelsen er også variabel på et ramme-for-ramme grunnlag fra to ms til 20 ms, og hver signalbunt (burst) kan inneholde flere sammensatte faste pakkestørrelser, variable pakkestørrelser eller fragmenter av pakker mottatt fra høyere lag. I utgangspunktet vil likevel alt WiMAX-utstyr kun støtte 5 ms rammelengde.

4.2.7.4.7. Rekkevidde Kanal

Opplink delrammen består av flere UL-signalbunter fra forskjellige brukere. En del av opplink delrammen er allokert til konkurransebasert aksess som benyttes til en rekke ulike formål. Denne delrammen brukes hovedsakelig som ranging-kanal til å utføre *lukket-sløyfe* i frekvens og i tid, og energjustering i løpet av nettverksetablering (network entry) og etterpå i en regelmessig måte. Rekkeviddekanalen kan også benyttes av abonnentstasjon eller mobilstasjon (SS/MS – merk forskjellen) for å gjøre opplink båndbreddeforespørsler. I tillegg kan data sendes ved hjelp av best-effort på denne konkurransebaserte kanalen, spesielt når datamengden som sendes er for liten til å rettferdiggjøre forespørsel om en dedikerte kanal.

4.2.7.4.8. Kanal Kvalitet Indikator kanalen (CIQCH) og ACK kanal

I tillegg til rekkeviddekanalen og trafikken signalbunt, har opplink delrammen en kanal-kvalitet- indikatorkanal (eng. Channel Quality Indicator Channel) for mobilstasjon til å gi tilbakemelding om kanalkvaliteten som kan utnyttes av basestasjonens kanalforvalter. Kvitteringskanal (ACK) allokeres for mobilstasjon til å gi tilbakemelding om nedlink kvittering (ACK). For å håndtere tidsvariasjoner støtter WiMAX et alternativ som handler om å repetere preambler oftere. Midambler som er korte preambler, kan brukes i opplink etter åttende-, 16.- eller 32.-symboler; i nedlink kan en kort preamble settes inn ved begynnelsen av hver signalbunt (eng. burst). Det er anslått at å ha en midambel i hvert 10. symbol kan mobilitet opptil 150 km/h tillates.

4.2.7.4.9. Kanaldeling (eng. subchannelization)

Tilgjengelige delbærere kan deles inn i flere små grupper av delbærere som kalles delkanaler, dette vet vi fra før. Fastnett WiMAX basert på OFDM-PHY tillater en begrenset form for kanaldeling, kun i opplink (UL). Standarden definerer 16 delkanaler der 1, 2, 4, 8 eller alle sett kan tildeles en abonnentstasjon (SS) i opplink. Opplink kanaldeling i fastnett WiMAX tillater SS til å sende ved bruk av bare en brøkdel (så lavt som 1/16) av båndbredde tildelt vedkommende SS av basestasjonen (BS), og dette gir link budsjettforbedringer som kan brukes til å forbedre rekkeviddeytelse og/eller forbedre batterilevetida av SS.

Mobile WiMAX basert på OFDMA-PHY tillater kanaldeling både i opplink (UL) og nedlink (DL). I dette tilfellet betraktes en delkanal som den minimale frekvensressursenheten allokert av BS. Derfor kan ulike delkanaler allokeres ulike brukere lik en multipl aksessmekanisme. Denne type metode for multiaksess kalles ”orthogonal frequency division multiple access” (OFDMA), navn døpt for Mobile WiMAX-PHY.

Delkanalene kan være konstituert ved hjelp av enten tilstøtende delbærere eller pseudorandomiserte fordelte delbærere over hele frekvensspekteret (altså distribuert). Delkanaler dannet ved den konstituerte metoden muliggjør frekvensdiversitet, som er spesielt nyttig for mobile applikasjoner. WiMAX definerer flere kanaldelingsmetoder basert på distribuerte delbærere for både UL og DL. En som er kalt ”Delvis Bruk av Delbærere” (eng. Partial Usage of Subcarriers – PUSC), er obligatorisk for alle mobile WiMAX-implementeringer. Den kan realiseres i UL PUSC og DL PUSC. Og den andre distribuerte permutasjonen inkluderer kun DL FUSC (Fully Used Sub-Carrier). De første WiMAX profiler definerer 15 og 17 delkanaler henholdsvis for DL og UL, for PUSC som opererer i 5 MHz BW. For 10 MHz BW er definert 30 og 35 delkanaler (se tabell 4.2-6/7).

Kanaldelingsmetoden basert på tilstøtende delbærere i WiMAX kalles Bånd Adaptiv Modulasjon og Koding (eng. Band Adaptive Modulation and Coding – AMC). Selv om frekvensdiversitet går tapt ved å benytte denne metoden, kan likevel bånd-AMC systemdesignere utnytte flerbrukerdiversitet. Det vil si at tildeling av delkanaler til brukere er basert på deres individuelle frekvensrespons. Flerbrukerdiversitet kan gi betydelige gevinster i total systemkapasitet hvis systemet strever for å tildele hver bruker en delkanal som maksimerer mottatte SINR. Generelt er tilstøtende delbærere mer egnet for fastnett- og lavmobilitetapplikasjoner, [9]. Det er seks delkanalsgrupper for hver FFT-størrelse, se tabell 4.2-8.

FFT size	Subchannel group	# Subchannel range	FFT size	Subchannel group	# Subchannel range
2048	0	0–11	512	0	0–4
	1	12–19		1	N/A
	2	20–31		2	5–9
	3	32–39		3	N/A
	4	40–51		4	10–14
	5	52–59		5	N/A
1024	0	0–5	128	0	0
	1	6–9		1	N/A
	2	10–15		2	1
	3	16–19		3	N/A
	4	20–25		4	2
	5	26–29		5	N/A

DL OFDMA PUSC:

1 Slot = 48 data SC + 8 pilot SC

* 1 Cluster = 14 SC/OFDMA Symbol
= 12 data SC + 2 pilot SC.

** Re-arranging schema:

1 Subchannel = 2 Cluster = 48 data SC + 8 pilot SC

1 Slot = 2 OFDMA symbols x 1 subchan.

UL OFDMA PUSC:

1 Slot = 48 data SC + 24 pilot SC

* 1 Slot = 6 Tiles = 1 Subchannel

** 1 Tile = 4 Subcarriers

*** There are 3 types of tiles(see Std.doc)

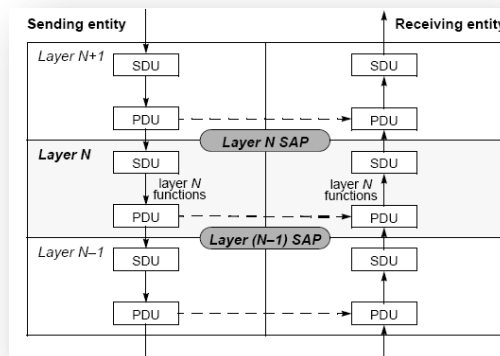
1 Slot = 3 OFDMA symbols x 1 Subchan.

(47 symb/frame, where 44 data symbols)

Tabell 4.2-8: a) Delkanal indeks av de seks delkanalgruppene ([8], table 315). b) Til høyre er en kort illustrasjon om kanaldeling i Mobile WiMAX.

4.2.8. IEEE 802.16 MAC laget overblikk

Hovedoppgaven til IEEE 802.16 MAC-laget er å skaffe grensesnitt mellom høyere transportlag og det fysiske laget. MAC-laget tar pakker fra de øvre lagene (disse pakkene kalles MAC-tjenestedataenheter (MSDU)) og organiserer dem i MAC-protokolldataenheter (MPDU) for overføring gjennom luft. For mottatte overføringer gjør MAC-laget omvendt.



Figur 4.2-8: Generelle PDU og SDU i en protokollstakk, [8].

IEEE 802.16-2009 MAC design inkluderer et konvergens dellag som grensesnitt med en rekke høyere lager protokoller, slik som ATM, TDM Voice, Ethernet, IP, osv. Dominerende

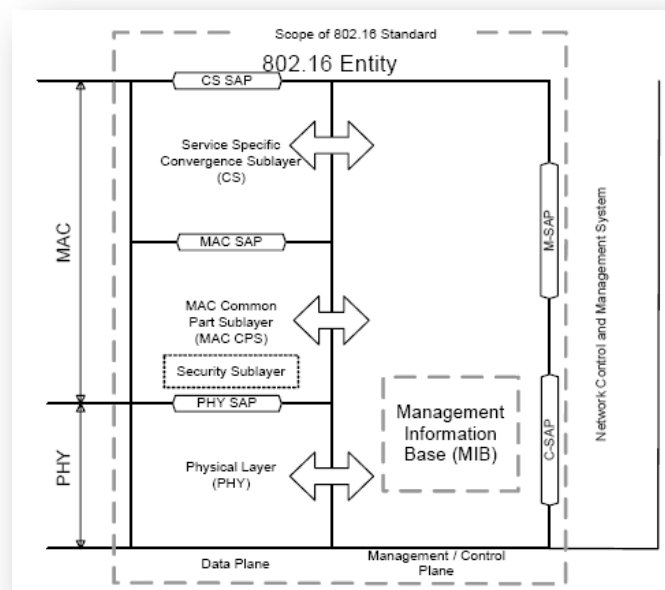
protokoller i bransjen er IP og Ethernet, derfor har WiMAX forumet besluttet for øyeblikk å støtte kun disse to. IEEE 802.16 MAC laget er delt i tre dellag:

- Tjeneste spesifikke konvergens dellag (Service Specific Convergence Sublayer, SSCS)
- Felles part dellag (Common Part Sublayer, CPS)
- Sikkerhets dellag (Security Sublayer, SS)

1) **SSCS:** Tjeneste Spesifikke Konvergens Dellaget ligger på toppen av MAC CPS og utnytter, via MAC SAP, tjenester levert av MAC CPS (se figur 4.2-9). CS utfører følgende funksjoner:

- a) Godtar høyere lags PDU (Protocol Data Unit) fra høyere lag.
- b) Utfører klassifisering av høyere lag PDU.
- c) Prosessering (om nødvendig) de høyere lagers PDU basert på klassifisering.
- d) Leverer CS PDU til riktig MAC SAP.
- e) Mottar CS PDU fra peer enhet.

Det er foreløpig tre CS spesifikasjoner: asynkron overføringsmodus (ATM) CS, pakket CS, og GP-CS (Generic Packet CS).



Figur 4.2-9: IEEE Std 802.16 referansemodell for protokoll. Beskrivelsen finnes i ([8], §1.4).

- 2) **CPS:** MAC CPS er en sentral del av MAC-laget og er ansvarlig for tilkoblingshåndtering, båndbredde allokering, PDU innramming, kanaldeling og dupleksering.
- 3) **CPS:** MAC CPS er en sentral del av MAC-laget og er ansvarlig for tilkoblingshåndtering, båndbredde allokering, PDU-innramming, kanaldeling og dupleksering.

- 4) **SS:** Sikkerhetsdellaget forbinder MAC CPS og det Fysiske laget gjennom PHY SAP og gir de nødvendige metodene for kryptering og dekryptering av data. SS dellaget benyttes også for autentisering og sikker utveksling av nøkler.

4.2.8.1. IEEE 802.16 MAC-laget har flere andre funksjoner

Kanal-aksessmekanismer: I WiMAX har MAC-laget på BS fullt ansvar for allokering av BW for alle brukere, både i UL og DL. Den eneste gangen MS har noen kontroll over BW allokering er når den har flere økter (eng. sessions) eller forbindelser med BS. I dette tilfellet allokterer BS en viss båndbredde i aggregatet, og det er opp til MS å fordele den blant sine økter. For DL, kan BS allokere BW til hver MS, basert på behovene til innkommende trafikk, uten å involvere MS. For UL, må allokeringer være basert på forespørslers fra MS. Mekanismer for å forespørre og tildele opplink båndbredde er polling (unicast, multicast). Hvis en MS allerede er allokert for sending av trafikk vil den ikke avspørres (eng. Polling), i stedet er det tillatt å forespørre mer BW ved (1) å sende forespørsel via ranging kanal, (2) båndbredde piggybacking forespørsel i generelle MAC-pakker, (3) å sende en stand-alone BW forespørsel MAC PDU.

Servicekvalitet (QoS): Støtte for QoS er en fundamental del av WiMAX MAC-lag design. Sterk QoS kontroll oppnås ved hjelp av en forbindelsesorientert MAC-arkitektur, hvor alle DL og UL tilkoblinger er kontrollert av betjente BS. Før noen dataoverføring skjer vil BS og MS etablere en enveis logisk oppkobling (kalt forbindelsen) mellom de to MAC-lag peers. Hver tilkobling er identifisert ved en forbindelsesindikator (CID), den fungerer som en midlertidig adresse for dataoverføring over en bestemt oppkobling. I tillegg til forbindelser for overføring av brukerdata, definerer WiMAX MAC tre håndteringsforbindelser (eng. Management connection), nemlig "basic, primary, secondary connections". Disse benyttes for funksjoner som ranging. For å støtte et bredt spekter av applikasjoner, definerer WiMAX fem tjenesteplanleggere (se tabell 4.2-9).

Energisparingsfunksjoner: For å støtte batteridrevne bærbare enheter, har mobile WiMAX definert strømbesparende funksjoner som muliggjør bærbare abonnentstasjoner å operere lengere perioder uten å måtte lade på nytt. Energibesparing oppnås ved å skru av deler av MS på en kontrollert måte når den ikke er i sendemodus eller mottar datasignaler. Mobile WiMAX definerer signaleringsmetoder som får MS til å trekke seg inn i en hvilemodus eller ubesatt modus når inaktiv. Tre strømbesparende klasser er definert til å støtte hvilemodus: klasse 1 (når MS bruker Best-Effort og ikke-sanntid trafikk), klasse 2 (UGS tjenester) og klasse 3 (for multicast- og håndteringstjenester). Standbymodus eller ubesatt er valgfritt i WiMAX.

Støtte for mobilitet: Nomadisk, bærbare, enkel mobilitet (opp til 60 kmph, < 1 sec oppholdstid i løpet av Handover) og full mobilitet (opp til 120 kmph og sømløs handover mindre enn 50 ms for < 1 % pakke tap)

Virkemåte for sikkerhet: Støtter brukerdatafortrolighet ved å benytte krypteringsmetoder som AES og 3DES. Utstyr/bruker autentisering med (IETF) EAP. Fleksibel nøkkelhåndteringsprotokoll med PKMv2. Vern av meldingskontroll som går ut på integritet av data i luft ved bruk av AES-basert CMAC eller MD5-basert HMAC. Støtte for hurtig handover der MS bruker pre-autentisering med en bestemt mål-BS for å øke tilbakevending (eng. Reentry) hastighet.

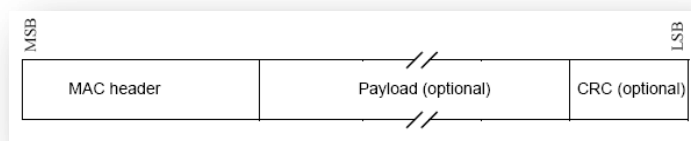
Multicast og Broadcast tjenester: Mobile WiMAX støtter MBS (multicast and broadcast services).

Flytingstjenester betegnelse	Definisjon av QoS Parametere	Anvendelse (eksempel)
UGS (Unsolicited Grant Services)	Maksimal varig rate Maksimal latens toleranse Jitter toleranse	Voice over IP (VoIP) uten lydempnings undertrykkelse
rtPS (Real-Time Polling Service)	Minimal reservert rate Maksimal varig rate Maksimal latens toleranse Trafikk prioritet	Lydoverføring og levende videooverføring i sanntid, MPEG (Motion Picture Experts Group) kodet
nrtPS (Non-real-time Polling Service)	Minimal reservert rate Maksimal varig rate Trafikk prioritet	Filoverføringsprotokoll (FTP)
BE (Best-Effort service)	Maksimal varig rate Trafikk prioritet	Nettleser, dataoverføring
ErtPS (Extended real-time Polling service)	Minimal reservert rate Maksimal varig rate Maksimal latens toleranse Trafikk prioritet Jitter toleranse	VoIP med lydempnings undertrykkelse

Tabell 4.2-9: Flytingstjenester og QoS parametere i WiMAX, ([4], s.51).

4.2.8.2. MAC PDU formater

MAC PDU skal være som på figur 4.2-10. Hver PDU skal begynne med en fast lengde MAC-header. Headermeldingen kan etterfølges av MAC PDU Nyttelast (eng. payload). Hvis det finnes skal nyttelasten eller data bestå av null eller flere delheaders meldinger og null eller flere MAC SDU-er / eller fragmenter av disse. Nyttelastinformasjonen kan variere i lengde, slik at en MAC PDU kan representere et varierende antall databyte. Dette gir anledning til MAC for gjør tunnelering av ulike høyere lags trafikktyper uten den minste kunnskap om formatene eller bit-mønstrene til disse meldingene.



Figur 4.2-10: MAC PDU format, ([8], figur 20).

Merk at en MAC PDU kan inneholde en CRC (Cyclic Redundancy Check). Implementering av CRC-evner er obligatorisk for OFDM og OFDMA PHYs. Ved konfigurasjon er alle reserverte felt satt til null på overføringside og ignorert på mottakesside.

4.2.8.3. MAC støtte over PHY sendemodus.

MAC-protokollen støtter flere duplekseringsteknikker. Valget av teknikk kan påvirke visse fysiske lags parametere, og/eller virkning av disse funksjonene.

FDD (Frequency Division Duplexing): I et FDD-system, er opplink (UL) og nedlink (DL) kanalene lokalisert på atskilte frekvenser og DL-data kan overføres i signalbunter (bursts). Ramme med fastperioden benyttes til både UL- og DL-overføringer. Dette forenkler bruk av ulike typer modulasjon. FDD gjør det også mulig at både FDD SSs og H-FFD SSs kan brukes samtidig. Det vil si full-dupleks SSs (abonnenter), som kan sende og motta samtidig, og eventuelt halv-dupleks SSs, som ikke kan. Hvis halv-dupleks er benyttet skal styringsenheten for båndbredde ikke allokere UL-båndbredde for en halv-dupleks SS (abonnet) i det øyeblikket den forventer å motta data på DL-kanalen, inkludert den tillatte forplantningsforsinkelsen, SS-sending/mottakelse overgangsgap (SSTTG) og SS-mottakelse/sending overgangsgap (SSRTG). En full-dupleks SS er i stand til å lytte kontinuerlig på DL-kanal, mens en halv-dupleks SS kan lytte til DL-kanalen bare når SS-en ikke har sending i UL-kanalen.

TDD (Time Division Duplexing): I TDD tilfellet, skjer opplink og nedlink-sendinger i ulike tider og vanligvis deler de samme frekvens. En TDD-radoramme har en fastperiode og inneholder én nedlink og én opplink delramme. Radorammen er delt inn i et heltall antall PSS (Physical Slots), som bidrar til en letter partisjonering av båndbredde. TDD-innramming er adaptivt, i at båndbredden allokert mellom DL og UL kan variere. Deling mellom UL og DL er et systemparameter og er kontrollert i hovedsak av MAC-laget innenfor systemet.

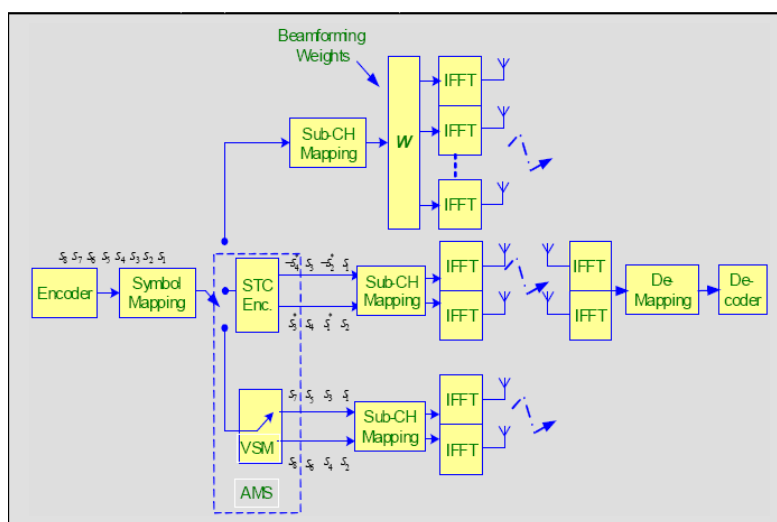
4.2.9. Multi Antenne Teknikker

Multiple antenneteknikker er vanligvis delt i Smart Antenne Systemer (SAS), Diversitets Teknikker (DT) og MIMO. Smart antenneteknologi involverer vanligvis komplekse vektor- eller matriseoperasjoner over signaler på grunn av flere antenner. OFDMA tillater smart antenneoperasjoner som utføres på vektor-plan delbærere. Komplekse utjevnerer er ikke nødvendige for å kompensere fenomener som oppstår ved frekvensselektiv fading. OFDMA er derfor svært godt egnet til å støtte smart antenneteknologi. MIMO OFDM/OFDMA er faktisk et stort steg foran neste generasjon av bredbånds-kommunikasjonssystemer. Mobile WiMAX støtter et komplett utvalg av smart antenne teknologi for å forbedre systemytelsen. Følgende multiantenneteknologiene benyttes:

- 1) **Beamforming**: Et system med beamforming, benytter flere antenner til å sende veide signaler for å forbedre dekning og kapasitet i systemet og redusere sannsynlighet for utilgjengelighet (eng. Outage). Dette er en form av SAS-teknikken.
- 2) **STC (Space Time Coding)**: Sendediversitet som eksempelvis Alamouti - koding, støttes for å gi romdiversitet og redusere fading margin. Dette er en DT-teknikk.
- 3) **SM (Spatial Multiplexing)**: Teknologien støttes for å dra fordelene av høyere datarater og økt gjennomstrømning. Med romlig multipleksing, kan flere datastrømmer overføres over flere antenner. Hvis mottakeren har også flere antenner, kan den skille de forskjellige datastrømmene for å oppnå høyere gjennomstrømning sammenlignet med enkelt-antenne systemer. For eksempel 2x2 MIMO øker SMs toppdatarate to ganger ved å sende to datastrømmer. I UL har hver bruker bare én

senderantenne. To brukere kan overføre ved hjelp av kooperasjon i den samme tidsluken som om to datastrømmer er romlig multiplekserert fra to antenner av samme bruker. Dette kalles UL samarbeids SM (eng. UL collaborative SM).

Mobile WiMAX støtter adaptiv svitsjing mellom disse tre alternativene (se figur 4.2-11) for å maksimere fordelene ved å bruke smart antennteknologi under ulike kanalbetingelser. For eksempel kan pakkefeilraten (PER) være høy og dermed begrense dekningsområdet hvor mål eller krevet PER nivå er oppfylt. STC derimot gir stor dekning uavhengig av kanaltilstand, men forbedrer ikke toppdataratene. Mobile WiMAX støtter adaptiv svitsjing mellom flere multiple antennemoduser for å maksimere spektral effektivitet uten reduksjon i dekningsområdet.



Figur 4.2-11: Mobile WiMAX arkitektur for adaptiv svitsjing over smart antenner [9].

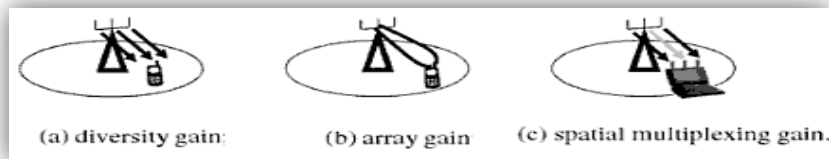
4.2.9.1. Fordeler av Spatial diversitet

En hovedfordel av romdiversitet i forhold til tids- og frekvensdiversitet er at ingen ekstra båndbredde eller signaleffekt er nødvendig for å kunne dra nytte av denne. Kostnaden for hver ekstra antenne, dets RF-krets og den tilhørende signalbehandlingen krevd for å modulere eller demodulere flere spatiale datastrømmer må tas i betraktning, men denne avveiningen er ofte svært attraktiv for et redusert antall antenner. Følgende er fordeler av spatial diversitet:

Diversitet Gain: Når flere antenner er til sted på mottakeren, er to former for gevinst tilgjengelige: diversitetsgevinst og arraygevinst. Diversitetsgevinst er et resultat av å etablere flere uavhengige kanaler mellom senderen og mottakeren, og er et produkt av statistikken over disse kanalene.

Økt Datarate: Diversitetsteknikker er meget effektive i å ta gjennomsnitt av dempning i transmisjonskanal og øke pålitelighet. Mottaker diversitetsteknikker øker også den gjennomsnittlige mottatte SNR lineært. Shannons teori definerte den maksimale dataratene for en enkel kommunikasjons radiolink i AWGN kanal som: $C = B \log_2(1 + \gamma)$: der B er kanal båndbredde og γ er SNR eller SINR. Merk at rom multiplekseringsteknikken øker datarate.

Økt dekningsområde eller redusert sendereffekt: På grunn av antall antenner på mottaker- (N_r) og sender (N_t) sider, og ved å benytte egenskaper ved arraygevinst, er den gjennomsnittlige SNR gitt ved produktet ($N_r \gamma$), der γ er den gjennomsnittlige SNR per gren.



Figur 4.2-12: Tre fundamentale multiple antennteknikker [18].

4.2.9.2. Mottakerdiversitet

Den meste benyttede formen av romdiversitet er mottakerdiversitet, ofte med bare to antenner. Denne type diversitet er ofte tilstedeværende på mobilnetts basestasjoner og trådløse LAN-aksesspunkter. Mottakerdiversitet setter ingen spesielle krav til senderen, men krever en mottaker med evner for å behandle N_r mottatte grener og kombinere dem på noen måte. To av de meste benyttede kombineringsalgoritmer er SC (Selection Combining) og MRC (Maximal Ratio Combining).

4.2.9.3. Senderdiversitet

Som følge av at signalene som sendes fra ulike sendeantennener forstyrres hverandre, kreves signalbehandling i både senderen og mottakeren for å oppnå diversitet ved å fjerne eller dempe den spatiale interferensen. Senderdiversitet er spesielt attraktiv for nedlink av infrastrukturbaserte systemer som WiMAX og LTE, ettersom den fordeler byrden på flere antenner til senderen. I dette tilfellet er det en basestasjon og dermed er det en stor fordel for mobilstasjoner som har veldig begrenset sendeeffekt, størrelse og kostnad. Multiple sendingsmetoder for antenner – både senderdiversitet og rommultipleksering (MIMO) – blir ofte kategorisert som enten Åpen Sløyfe (Open Loop) og Lukket Sløyfe (Closed Loop).

Åpen Sløyfe: dette systemet krever ingen kunnskap om kanalen på senderens side. Teknikken er delt inn i Matrise A og Matrise B. Matrise A refererer til STBC (Space Time Block Coding) og har som mål å gjøre nyttegjøre seg kanalens romdiversitet; mens Matrise B refererer til SM (Spatial Multiplexing) og har som mål å øke datakapasitet i WiMAX-systemer.

Lukket Sløyfe: dette systemet krever kunnskap om kanalen på senderens side, dermed er det nødvendig med enten en gjensidig kanal (samme UL- og DL-kanal) eller en tilbakemeldingskanal fra mottakeren til senderen. Lukket sløyfe benytter ”beamforming” for å realisere diversitet (forbedrer dekning og kapasitet).

4.3. IEEE 802.16m (IMT-A)

”” IEEE 802.16’s 802.16 Task Group m (TGm) is chartered to develop an amendment to IEEE Standard 802.16 under the PAR P802-16m and the relevant Five Criteria Statement statement. The PAR addresses ”Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems – Advanced Air Interface” and was approved by the IEEE-SA Standards Board on 6 December 2006. ””

Dette utsagnet er hentet fra TGm’s hjemmeside, en arbeidsgruppe for avansert WiMAX mobilsystemer som er ansvarlig for å gjøre endringer/rettinger i 802.16 WirelessMAN-OFDMA-spesifikasjonen i den hensikt å utvikle et avansert luftgrensesnitt i lisensierte bånd under 11 GHz. Dette vil oppfylle krav til IMT-As neste generasjonsmobilnett. Endringer i IEEE 802.16m bør gi kontinuerlig støtte for eldre WirelessMAN-OFDMA-utstyr. På Hjemmesida finner en *kjernedokumenter* i form av utkast:

IEEE 802.16m System Requirements Document (SRD): Alt innhold inkludert i hvilket som helst utkast til 802.16m skal oppfylle disse kravene. Dette dokumentet, derimot, skal opprettholdes og kan utvikle seg. Kravene i dette dokumentet er også en påkallelse for betydelige gevinster og forbedringer i forhold til eksisterende IEEE 802.16 systemer som ville rettferdiggjøre opprettelsen av det avanserte radiogrensesnitt.

IEEE 802.16m System Description Document (SDD): Dette dokumentet representerer IEEE 802.16m systembeskrivelse. Systembeskrivelsen er basert på SRD. Alt innhold inkludert i hvilket som helst utkast til IEEE 802.16m skal være i samsvar med beskrivelse av systemnivå i dette dokumentet samt i samsvar med kravene i SRD. Dette dokumentet, derimot, skal opprettholdes og kan utvikle seg.

IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document (EMD): Målet med denne evalueringsmetoden er å definere linknivå og systemnivå for simuleringsmodeller og tilhørende parametre som skal benyttes ved vurdering og sammenligning av teknologiforslag til IEEE 802.16m. Alle teknologi kandidater som bruker denne metodikken skal følge evalueringsmetoder definert i dette dokumentet og rapportere resultatene ved hjelp av beregninger som er definert i dette dokumentet. Metodene gitt i denne EMD kan utvides eller forbedret for å justere med [IMT.EVAL] eller videre konkrete forslagsvurderinger som ikke omfattes av dette dokumentet.

Hensikten med denne standarden er å gi ytelsesforbedringer nødvendige for å støtte fremtidige avanserte tjenester og applikasjoner, slik som beskrevet i ITU-rapporten ITU-R M.2072 og IMT-A (IMT.SERV).

4.3.1. Generelle krav

Kontinuerlig støtte: IEEE 802.16m skal gi kontinuerlig støtte og interoperabilitet for eldre WirelessMAN-OFDMA utstyr, inkludert mobilstasjoner og basestasjoner.

Kompleksitet: IEEE 802.16m bør redusere kompleksitet i arkitekturen og protokoller, og unngå overdrivelse på kompleksitet i system.

Tjenester: IEEE 802.16m bør støtte arvingstjenester (fra eldre standarder) mer effektivt enn WirelessMAN-OFDMA referansesystem og samt legge til rette for innføring av nye/type tjenester.

Arbeidsfrekvens: IEEE 802.16m systemer skal operere i RF frekvensbånd under 6 GHz og være implementerbar i linsensierte og allokerede spektrum for mobile og fastnett bredbåndstjenester, og skal kunne operere i frekvenser identifisert for IMT-A (se tabell 2.4-1).

Båndbredde: IEEE 802.16m system skal ha evner for skalerbar båndbredde som muliggjør fleksibilitet for allokering av forskjellige båndbredder. Standarden skal støtte skalerbare båndbredder mellom 5 og 40 MHz. Dette kan gjøres ved å benytte én eller flere RF-bærere.

Dupleks metoder: Standarden skal støtte både TDD og FDD operasjonsmetoder. En tredje metode er Halv-FDD MS (mobilstasjon). Den er definert for men ikke nødvendigvis at en mobilstasjon skal sende og motta samtidig.

Avanserte antenne teknikker: Standarden skal definere minimumskrav for antall antenner på basestasjon (BS) og mobilstasjon (MS). For BS, skal minst 2x2 antenner. For MS skal minst 1x2 antenner. Dette er i samsvar med 2x2 nedlink konfigurasjon og en 1x2 opplink konfigurasjon. Alternative teknikker er: MIMO, Beamforming eller andre avanserte antenne teknikker. MIMO skal støtte enkeltbruker og flerbrukere teknikker.

Offentlig sikkerhet: IEEE 802.16m standarden skal kunne støtte offentlig sikkerhet først anrop, militære og beredskape tjenester som for eksempel samtale-prioritering, forkjøpsrett, og push-to-talk. Standarden skal også støtte regionale regelverket, f.eks. Nødtelefon (E9-1-1) og Communications Assistance for Law Enforcement Act (Calea).

Fullstendig kravliste er detaljert i Rapport [System Requirements Document] for IEEE 802.16m. Rapporten støtter den IMT-A hensikten om fremtidige mobilnett systemer [2] [1].

4.3.2. IEEE 802.16m Fysiske lag

4.3.2.1. Dupleks moduser

IEEE 802.16m støtter TDD og FDD dupleks moduser, inkludert H-FDD AMS for mobiloperasjon [10]. Med mindre annet er spesifisert, er attributer for rammestruktur og basisbånd behandling felles for alle de duplekseringsmodusene.

4.3.2.2. Nedlink og Opplink Multippel Aksess Metoder

IEEE 802.16m benytter OFDMA for både nedlink og opplink.

4.3.2.3. OFDMA Parametere for IEEE 802.16m

Tabellen nedenfor viser fem forskjellige profiler definerte i 5, 7, 8.75, 10, og 20 MHz båndbreddene. Disse parameterne er definert likesom i tabell 4.2-4 og tabell 4.2-5.

Parametere		Profil				
Nominal kanalbåndbredde (MHz)		5	7	8.75	10	20
Oversamlings Faktor, n		28/25	8/7	8/7	28/25	28/25
Samplings Frekvens (MHz)		5.6	8	10	11.2	22.4
FFT størrelse		512	1024	1024	1024	2048
Delbærere-mellomrom (kHz)		10.9375	7.8125	9.765625	10.9375	10.9375
Nyttig Symboltid T_u (μ s)		91.429	128	102.4	91.429	91.429
Syklisk Prefiks (CP) $T_b = 1/8 T_u$	Symboltid T_S (μ s)		102.857	144	115.2	102.857
	FDD	Antall OFDM symboler/ramme	47	34	43	47
		Tomgangstid "Idle Time" (μ s)	62.857	104	46.40	62.857
	TDD	Antall OFDM symboler/ramme	47	33	42	47
		TTG+RTG (μ s)	165.714	248	161.6	165.714
Syklisk Prefiks (CP) $T_b = 1/16 T_u$	Symboltid T_S (μ s)		97.143	136	108.8	97.143
	FDD	Antall OFDM symboler/ramme	51	36	45	51
		Tomgangstid (μ s)	45.71	104	104	45.71
	TDD	Antall OFDM symboler/ramme	50	35	44	50
		TTG+RTG (μ s)	142.853	240	212.8	142.853
Syklisk Prefiks (CP) $T_b = 1/4 T_u$	Symboltid T_S (μ s)		114.286			114.286
	FDD	Antall OFDM symboler/ramme	43			43
		Tomgangstid (μ s)	85.694			85.694
	TDD	Antall OFDM symboler/ramme	42			42
		TTG+RTG (μ s)	199.98			199.98

Tabell 4.3-1: OFDMA parametere for IEEE 802.16m, [11]. CP størrelse $\frac{1}{4}$ brukes i kanaler med lang spredsforsinkelse.

4.3.2.4. Ramme struktur

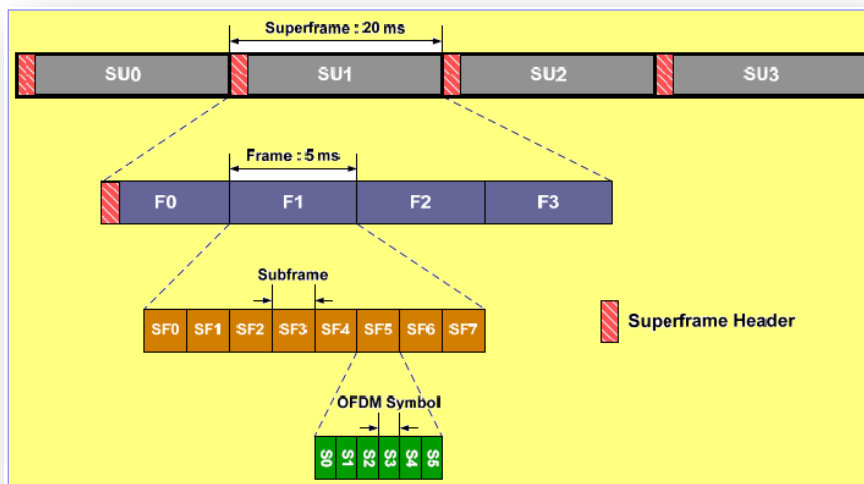
IEEE 802.16m grunnleggende rammestrukturen har følgende oppbygging:

Hver 20 ms superramme er delt inn i fire like store 5 ms radiatorammer og begynner med superramme header (SFH). Når en benytter de samme OFDM parameterne som i tabell 4.3-1 med kanalbåndbredde på fem MHz, 10 MHz eller 20 MHz, består hver 5 ms radiatoramme av åtte delrammer. En delramme er tildelt enten DL eller UL transmisjon. Det er tre type delrammer, og alle disse er anvendbart for FDD, TDD og H-FDD MS dupleks moduser:

Delramme type	OFDM symboler/delramme	Delramme lengde (ms)
1	6	0.617
2	7	0.720
3	5	0.514

Tabell 4.3-2: Delramme typer for IEEE 802.16m. Tallene i kolonner 2 og 3 kan forandre seg. I dette tilfellet er beregninger basert ved å anta: 5 MHz, 10 MHz, og/eller 20 MHz sertifiseringsprofiler med $CP = 1/8 T_u = 11.429 \mu s$, (Se tabell 4.3-1).

Det er to vekslingspunkter i hver radoramme for TDD systemer, hvor et vekslingspunkt er definert som en endring av retning (f.eks. fra DL til UL eller omvendt). Når H-FDD mobilstasjoner inngår i et FDD-system, er ramme strukturen fra synspunkt av H-FDD mobilstasjonen lik som i TDD ramme struktur, men DL og UL sendinger forekommer denne gangen i to forskjellige frekvensbånd. Overføringsgaper mellom DL og UL (og omvendt) er nødvendige for å tillate veksling mellom elektroniske kretser på senders og mottakers side.



Figur 4.3-1: Grunnleggende rammestruktur. Her er delramme 5 (SF5) av type 1, [11].

4.3.2.5. Illustrasjon av rammestruktur

Figur 4.3-3 illustrerer et TDD rammestruktur eksempel med (DL:UL) = 5:3. Forutsetninger for beregning er: OFDMA nyttige symbolperioden $T_u = 91.429 \mu s$, forholdsfaktor $G = 1/8$ (tabell 4.2-4), delrammer type-1 og 3 er benyttet, $TTG = 106 \mu s$, og $RTG = 60 \mu s$. Merk at med andre parametere vil radoramme ha forskjellig struktur som for eksempel variasjon av delrammer innen en radoramme, antall symboler i en delramme og OFDM-symbol lengde. Lengden av radoramme i eksempel nedenfor skal holdes konstant på 5 ms.

- a) - Ser man OFDM-symbol i tidsdomene (figur.4.2-3) og de primitive og deriverte symbolparameterne på tabell 4.2-4, har vi:

$$CP = G * T_u = 1/8 * 91.429 \mu s = \underline{11.429 \mu s}. \quad (\text{Syklisk Prefiks, } T_g)$$

$$T_s = CP + T_u = \underline{102.857 \mu s}. \quad (\text{Symbol Tid})$$

$$\text{Delramme type 1: } SF_a = T_s * 6 \text{ OFDM symboler} = \underline{617.142 \mu s}.$$

$$\text{Delramme type 2: } SF_b = T_s * 7 \text{ OFDM symboler} = \underline{719.999 \mu s}.$$

$$\text{Delramme type 3: } SF_c = T_s * 5 \text{ OFDM symboler} = \underline{514.285 \mu s}.$$

b) - En 5:3 radoramme som vist på figur 4.3-3, gir følgende:

$$\text{DL halv-ramme} = (\text{SF}_a * 4 \text{ delrammer}) + (\text{SF}_c * 1 \text{ delramme}) = \underline{2982.853 \mu\text{s}}$$

$$\text{UL halv-ramme} = \text{SF}_a * 3 \text{ delrammer} = \underline{1851.426 \mu\text{s}}$$

c) - Radoramme lengde:

$$\text{RF} = \text{DL halv-ramme} + \text{UL halv-ramme} + \text{TTG} + \text{RTG} = 4994.279 \mu\text{s} \approx \underline{5 \text{ ms}}$$

d) – Slik beregner vi parametere vist i tabell 4.3-1:

(for N_{brukt} se tabell 4.2-4 , og n finnes i tabell 4.3-1)

N_{FFT} : Den minste potensen i to som er større enn N_{brukt} kan være: [512, 1024, 2048]

Samplingsfrekvens : $F_s = \text{floor} (n * \text{BW}/8000) * 8000 = 5.6 \text{ MHz}, 11.2 \text{ MHz}, 22.4 \text{ MHz}$ for (5, 10, og 20 MHz henholdsvis , og $n = 28/25$).

$$\Delta f = F_s / N_{\text{FFT}} = \underline{10.9375 \text{ kHz}} \quad \text{og} \quad T_u = 1 / \Delta f = \underline{91.429 \mu\text{s}}$$

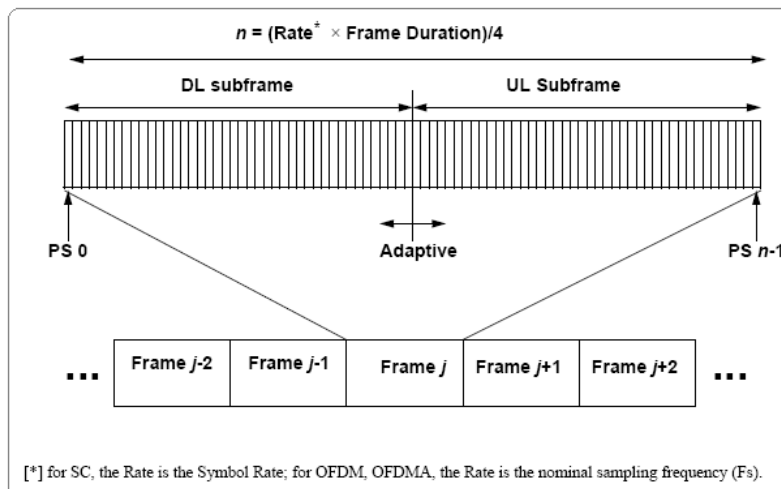
e) TTG og RTG :

TTG (Transmit/Receive Transition Gap) er et gap mellom DL signalbunt og etterfølgende UL signalbunt. Gapet gir anledning for BS til å svitsje fra Tx til Rx modus, og under gapet kan BS ikke overføre noen modulerte data. Gapet tillater kun at BS sendingsbærefrekvens skal rampe ned, Tx/Rx antenner bytter sine roller og aktivering av BS mottakers seksjon. Etter gapet skal BS mottakeren forvente for det første symbolet på UL signalbunt. Dete gapet er et heltall som multipliseres med den totale PS (Physical Slots) varigheten. En PS periode regnes som et produkt mellom 4 modulasjonssymboler og samplingsperiode for DL-symbol, dvs.: ($\text{PS} = 4 / F_s$) der F_s står for samplingsfrekvens. Gapet skal starte på en PS randsone.

RTG (Receivet/Transmit Transition Gap) er et gap mellom UL signalbunt og den etterfølgende DL signalbunt. Her gjennomføres en motsatte prosedyre av denne som er illustrert over for TTG gapet. Se tabellen nedenfor.

BW (MHz)	5	10	20	8.75	7
TTG (μs)	148 PS	296 PS	592 PS	218 PS	376 PS
RTG (μs)	84 PS	168 PS	336 PS	186 PS	120 PS

Tabell 4.3-3: TTG og RTG, [12].



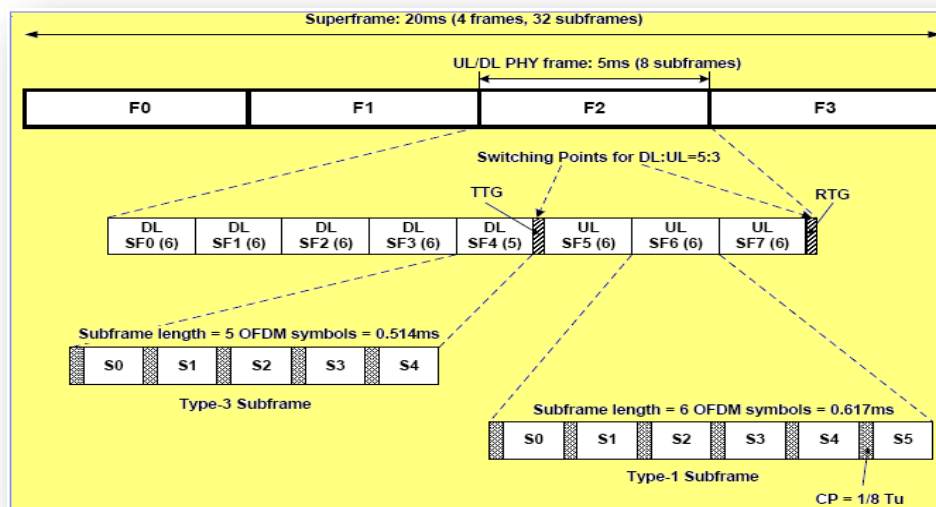
Figur 4.3-2: TDD rammestruktur og PS (Physical Slots). En ramme er delt inn i et heltall antall PS (Physical Slots) som bidrar for en enklere båndbreddes partisjonering. TDD innramming er adaptiv, dette vil si at den allokerede link-kapasiteten (båndbredde) kan variere for både DL og UL [8]. Kapasitetsdeling mellom UL og DL er en parametere som styres av høyere lag i systemet.

f) - Overføring tidsintervall:

TTI (Transmission Time Intervall) er tiden det tar å overføre kodede pakker for det fysiske laget over radiogrensensnitt. Den er lik en heltall delramme-lengde. Standard TTI-verdien er på 1 delramme.

g) - Oversikt over en 5 ms radiatoramme:

- Total antall symboler i radiatoramme = (7 delrammer * 6 OFDM symboler) + 1 delramme * 5 OFDM symboler = 47.
- Total CP-tid = $11.429 \mu\text{s} * 47 \text{ OFDM symboler} = \underline{537.163 \mu\text{s}}$.
- CP percentil over radiatoramme = $537.163/4994.279 = 10.75 \approx \underline{11\%}$.



Figur 4.3-3: Super ramme, delramme og OFDM symboler i TDD(CP = 1/8 Tu). [11].

4.3.2.6. Opplink fysiske struktur

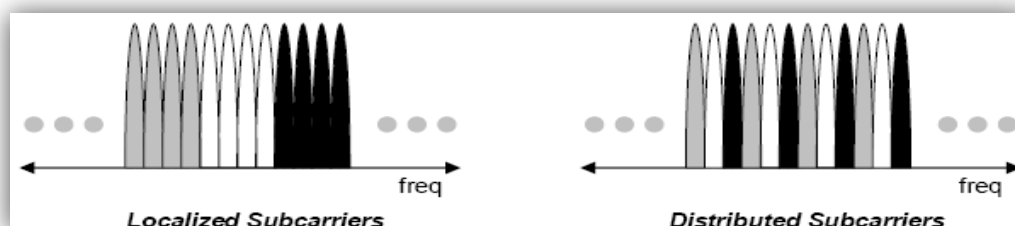
Hver UL delramme er delt inn i en rekke frekvensbaserte partisjoner. Hver partisjonen består av et sett av fysiske ressursenheter på tvers av en totale OFDMA-symboler tilgjengelige i delrammen. Hver frekvenspartisjonen kan brukes til ulike formål f.eks. FFR (fractional frequency reuse).

4.3.2.7. Den fysiske og logiske ressursenheten for opplink

En fysiske ressursenhet (PRU) er den grunnleggende fysiske enheten for ressurstildeling som omfatter P_{sc} fortløpende delbærere av N_{sym} fortløpende OFDMA symboler. P_{sc} er av 18 delbærere og N_{sym} er antall OFDMA symboler avhengig av delramme type. En logiske ressursenhet (LRU) er den grunnleggende logiske enheten for distribuerte og lokaliserte grupper. Den er definert ved $(P_{sc} * N_{sym})$ delbærere for dataoverføring. For overføring av styringsinformasjon er LRU størrelse like som denne definerte for dataoverføring, og flere brukere kan dele én eneste LRU dedikerte for styringsinformasjonen. Antall av de effektive data-delbærere i en LRU avhenger av antall tildelte piloter og tilgjengelige styringskanaler.

4.3.2.8. Kanaldeling og ressursavbildning (ressurs mapping) for UL

Delbærere av et OFDMA-symbol er partisjonert i ($N_{g,left}$) venstre sikkerhetsdelbærere, ($N_{g,right}$) høyre sikkerhetsdelbærere, og (N_{used}) brukerdata delbærere. DC delbærere er ikke lastet. N_{used} delbærere er delt inn i PRU-er. Hver PRU inneholder pilot og data delbærere. Antall brukte piloter- og data-delbærere avhenger av MIMO-modus, rank og antall AMS-multiplekseret, og ressursallokerings metode (istribuerte eller lokaliserte ressursallokering). Type av benyttede delrammer har også innvirkning (f.eks. Type-1, type-2 eller type-3).



Figur 4.3-4: Distribuerte eller lokaliserte ressursallokering [13].

4.3.2.9. Fysiske struktur for nedlink

Hver DL delramme er delt inn i en rekke frekvensbaserte partisjoner. Hver partisjonen består av et sett av fysiske ressursenheter på tvers av et totale antall OFDMA-symboler tilgjengelige i delrammen. Hver frekvenspartisjonen kan inneholde lokaliserte og/ eller distribuerte fysiske ressursenheter. Hver frekvenspartisjonen kan brukes for ulike formål som FFR eller multicast og broadcast services (MBS).

4.3.2.10. Den fysiske og logiske ressursenheten for nedlink

En fysiske ressursenhet (PRU) er den grunnleggende fysiske enheten for ressursallokering som omfatter P_{sc} fortløpende delbærere av N_{sym} fortløpende OFDMA-symboler. P_{sc} er av 18 delbærere og N_{sym} er formet av 6 OFDMA-symboler for type-1 delrammer eller 7 OFDMA-symboler type-2 delrammer eller 5 OFDMA-symboler for type-3 delrammer. En logiske ressursenhet (LRU) er den grunnleggende logiske enheten for distribuerte og lokaliserte

grupper. En LRU er (18*6) delbærere for type-1, (18*7) delbærere for type-2 og (18*5) delbærere for type-3 delrammer. Merk at LRU inkluderer i sin numerologi antall piloter som benyttes i en PRU, og kan omfatte styringsinformasjon.

4.3.2.11. Kanaldeling og ressursavbildning for nedlink

Den er samme som i avsnitt 4.3.2.8 for opplink.

4.3.2.12. 802.16e-2005 versus 802.16m

Dette er en kort oppsummering for standarder sine grunnleggende egenskaper.

	802.16 TM – 2009				802.16m (mål)				
Kanal båndbredde (MHz)	5	7	8.75	10	5	7	8.75	10	20
FFT størrelse	512	1024			512	1024			2048
Delbærere mellomrom (kHz)	10.94	7.8125	9.765625	10.94	10.94	7.8125	9.765625	10.94	
DL Aksess	OFDMA				OFDMA				
UL Aksess	OFDMA				OFDMA				
Dupleks	TDD / FDD				TDD / FDD				
Delbærere Avbildning	Lokalisert og Distribuert				Lokalisert og Distribuert				
Delbærere hopping	Ja				Ja				
Data modulasjon	QPSK, 16QAM, 64QAM				QPSK, 16QAM, 64QAM				
Kanal koding **	CC, CTC, BTC, LDPC.				CC, CTC, BTC, LDPC.				
MIMO ***	Beamforming, ST-koding, og Rom multipleksing				Beamforming, ST-koding, og Rom multipleksing				
Topp Datarate, (DL/UL) Mbps	46/4 (2x2 MIMO, 10MHz(DL:UL=3:1))				225/33.75 20MHz (DL:UL = 3:1)				
Hensikt	Støtte for fullt mobilitet og assymmetrisk link.				Høyere dararater, mindre latenstid, effektive sikkerhetsmekanismer, bedre QoS.				

Tabell 4.3-4: Sammenligning av IEEE 802.16 standarder.

** CC = Convolutional Coding, CTC = Convolutional Turbo Coding, BTC = Block Turbo Coding, LDPC = Low Density Parity Check Code.

*** ST = Spatial Time.

4.4. LTE

4.4.1. Overblikk over cellulære^A teknologier

Den første radio mobiltjenesten ble introdusert i USA på slutten av 40-tallet, og var ment for å koble kjøretøys mobilbrukere til det offentlige fastnettet. Bell Systems kalt IMTS (Improved Mobile Telephone Service), ble lansert på 60-tallet. Dette kom med flere forbedringer som f.eks. direkt oppringing og høyere båndbredde. Det første analoge mobilsystemet var basert på IMTS og utviklet seg på slutten av 60-tallet og begynnelsen av 70-tallet. Systemer ble denne gangen kalt for ”cellulære” fordi dekningsområdet ble delt inn i mindre soner eller ”celler”. Hver av disse celler var betjent av en sender-mottaker med lav strømforbruk.

Et cellulære nettverk er et radionettverk som består av en rekke små radioceller. Hver betjent av minst en fast sender-mottaker eller basestasjon. Disse cellene dekker ulike landområder for å gi radiodekning over et større område enn det som ville betjenes av en enkelt celle. Dette øker antall mobile mottakere i en celle og bevegelse av disse gjennom andre celler ved hjelp av handover under overføring [40].

Følgende tabell ramser opp noen av teknologiske egenskaper gjennom flere generasjoner.

Generasjon	År/ (Utgave)	Latens (RTT)	Nettverk	Teknologi	Data type	Datarate (bps)
1G	70-tallet		Linje-svitsjing	TACS, AMPS	Analog talesignal	
2G	80-tallet		D-AMPS, GSM, CDMA	D-AMPS, GSM, IS-95	Digital talesignal	
2.5G	1996		Linje-svitsjing eller Pakke-svitsjing	GPRS, EDGE, EVDO, EVDV	Digital talesignal, Data	
3G	2000 (Rel.99/4)	150 ms	Ikke IP, Linje-svitsjing eller Pakke-svitsjing	W-CDMA, CDMA2000	Roaming, Digital talesignal, høy datarate, Video	0.8 M (UL) 2.05 M(DL)
	2003 (Rel.5/6)	100 ms		HSPA:HSDPA/ HSUPA(CDMA)		5.7 M(UL) 14 M(DL)
	2004 (Rel.7)	50 ms		HSPA+ (CDMA), MIMO		11 M(UL) 42 M(DL)
4G	Est. 2010 (Rel.8)	10 ms	IP basert, Pakke-svitsjingskjerne nettverk	(OFDMA/ SC-FDMA) 3GPP LTE WiMAX 3GPP2 UMB	Digital talesignal, høy datarate, Multimedia, Sikkerhet	50 M (UL) 100 M (DL)

Tabell 4.4-1: Utvikling av cellulære teknologier [14].

4.4.2. Introduksjon om LTE

✚ [Jeg velger deretter å kalle (*E-UTRA + E-UTRAN*) for *LTE*]

3GPP LTE er et prosjekt av 3GPP-gruppe med hensikt for å videreutvikle den gjeldende cellulære mobilteknologien basert på UTRA (radiogrensesnitt) og UTRAN (nettverk). LTE er markedsført som 4G. LTE-prosjektet som er blitt introdusert gjennom 3GPP Release 8, er et sett med forbedringer av UMTS. Den siste versjonen av Release 8 er datert i april/2009.

LTE har som mål å danne et utviklingsrammeverk baserte på 3GPPs radioaksessteknologi som støtter levering av høyere datarater til brukere, lavere latenstid, bredere spekteret, forbedrede dekning, og pakke optimaliserings radioteknologi.

Det er tre grunnleggende teknologier som ligger bak LTE radiogrensesnittsdesign: (1) Flerbærebølger teknologi som dreier seg om OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) for Nedlink og SC-FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access) for opplink. (2) Flere-antenne teknologier som utvikler seg til en rekke funksjonsinnhold for eksempel beamforming, MIMO. (3) Radiogrensesnitt baserte på pakkesvitsjing. LTE har også innført skalerbar båndbredde som vil variere mellom 1.25 MHz og 20 MHz (i motsetning til fast 5 MHz kanalbredde for UTRA). Teknologien innfører avanserte datamodulasjons teknikker, nemlig BPSK, QPSK, 8PSK, 16 QAM, 64 QAM.

4.4.3. LTE tekniske krav

3GPP LTE arbeidsgruppe for tekniske spesifikasjoner kalt for TSG, bruker sju kategorier for å definere tekniske krav [26], noen av disse kategorier dem er illustrert i tabellen nedenfor.

Kapasitets (beslektede) krav			Kommentarer
Topp Datarate	DL: 2rx antenner, UE	100 Mbps	Innen 20 MHz (5 bps/Hz)
	UL: 1tx antenne, UE	50 Mbps	Innen 20 MHz (2.5 bps/Hz)
Latenstid	Kontrollflate latenstid ¹	100 ms	Fra venting (camped) tilstand (Idle Mode, Rel.6) til en aktiv tilstand
		50 ms	Mellom hvilende (dormant) tilstand (release.6) og en aktiv tilstand
	Brukerflate latenstid ²	< 5 ms	I ubelastet forhold (f.eks. enkeltbruker med enkel datastrøm) for små IP-pakker
System ytelseskrav			
Bruker gjennomstrømning	Nedlink ³	(2-3) x (Rel.6 HSDPA)	Mål for bruker gjennomstr. per MHz ved 5% punkt av C.D.F.
		(3-4) x (rel.6 HSDPA)	Mål for gjennomsnitt bruker gjennomstr. per MHz (maks. 2tx NodeB, 2rx UE)
	Opplink ⁴	(2-3) x (Rel.6 Enhanced UL)	Deployering med enkelt Tx antenne på UE og 2 Rx antenner på NodeB
		(2-3) x (Rel.6 Enhanced UL)	
Spektrum effektivitet (bps/Hz/site)	Nedlink	(3-4) x (rel.6 HSDPA)	Maksimum for 2 Tx antenner på NodeB og 2 Rx antenner på UE.
	Opplink	(2-3) x (Rel.6 Enhanced UL)	

Mobilitet (Kmph)	Lav mobilitet	0 – 15	Optimalisert mobilitet
	Høy mobilitet	15 - 120	Støtter høy-ytelse mobilitet
	Veldig høy mobilitet	120 - 350	Mobilitet skal opprettholdt
Dekning (Km)		5	Bruker gjennomstr., Spektral effektivitet og Mobilitet burde være oppfylt
		30	User Throughput: Liten degradasjon, Spektrum med betydelige degradasjoner men akseptable, Mobilitet burde være oppfylt.
		100	Burde ikke utelukkes av spesifikasjoner
Båndbredde område (MHz)		1.4 - 20	I begynnelsen startet fra 1.25 MHz
Generelle krav			
Kostnadsbeslektede krav	Backhaul overføringsprotokoller skal være optimert		
	E-UTRAN arkitektur skal redusere kostnader av framtidige nettverksdeployering		
	Alle grensesnitt spesifiserte skal være åpent for multi-leverandørs utstyrsinteroperabilitet		
	UE kompleksitet og strømforbruk skal minimeres/optimeres.		
Tjenestersbeslektede krav			
Nettleser, FTP, video-strømming, og mer avanserted tjenester (f.eks. sanntids video eller push-to-tx)			

Tabell 4.4-2: LTE tekniske krav [18] [26].

¹ System bør kunne støtte et stort antall brukere per celle med kvasi umiddelbar aksess til radioressurser i aktiv tilstand. Det forventes minst 200 brukere/celle i aktiv tilstand for 5 MHz, 400 brukere/celle for høyere spektrum allokering. En mye høyere antall brukere i dvale (dormant) og i ventestilling tilstander.

² E-UTRAN båndbredde modus kan påvirke opplevd ventetid.

³ Brukerens gjennomstrømning bør skaleres etter båndbredde spektrumet.

⁴ Brukerens gjennomstrømning bør skaleres med BW spekteret forutsatt at den maksimale overføringseffekten også skaleres.

4.4.4. LTE fysiske lag

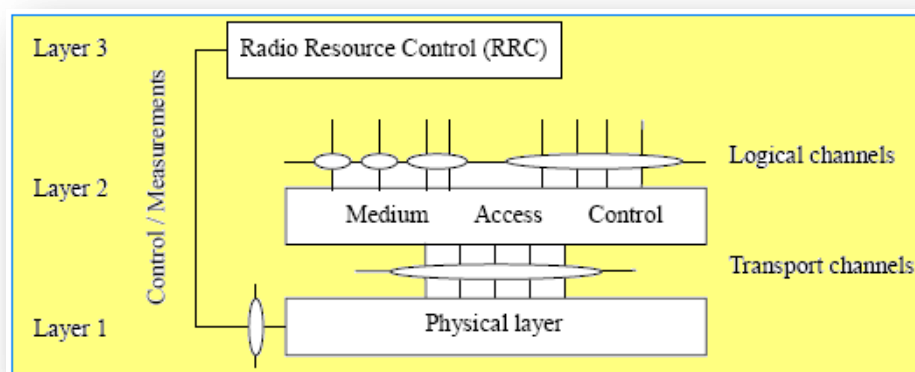
Generelle beskrivelse for LTE fysiske laget er basert på [15]. Figur 4.4-1 nedenfor illustrerer hvordan fysiske laget for LTE forholder seg med øvre lag.

Rollen for det fysiske laget er først og fremst å konvertere datastrøm til et pålitelig/tilpasset signal som kan sendes over radiogrensesnitt mellom eNodeB (Basestasjon) og brukerutstyr (UE). Det fysiske laget setter opp grensesnitt med både MAC dellag (av lag 2) og Radio Ressurs Control (RRC) dellag (av lag 3). Sirkler mellom ulike lager/dellager indikerer SAPs (Service Access Points). Det fysiske laget tilbyr transport kanaler til MAC. Disse kanalene er karakterisert på grunnlag av måten informasjonen overføres til radiogrensesnittet. MAC tilbyr ulike logiske kanaler til Radio Link Control (RLC) dellag av lag 2. En logisk kanal er karakterisert av type informasjonen som overføres igjennom.

4.4.4.1. PHY-lags tjenester til høyere lag

Det fysiske laget tilbyr data transporttjenester til høyere lag. Tilgangen til disse tjenestene er gjennom transport kanaler via MAC delaget. Det fysiske laget er forventet å utføre følgende funksjoner for å kunne realisere data transport tjenester:

- Feil deteksjon på transportkanalen og indikasjon til høyere lag.
- FEC koding / dekodning av transportkanalen.
- Hybrid ARQ soft-kombinasjon
- Rate matching av den kodede transportkanalen til fysiske kanaler.
- Effekt justering av de fysiske kanalene.
- Modulasjon og demodulasjon av de fysiske kanalene.
- Frekvens og tid synkronisering.
- Radio egenskapsmålinger og indikasjon til høyere lag.
- MIMO antenne prosesseteknikker
- Senderdiversitet
- Beamforming
- RF prosesseteknikk



Figur 4.4-1: Arkitektur for radiogrensesnitts protokoll,[15].

4.4.4.2. Generelle beskrivelse av LTE- PHY lag

Fem funksjoner som karakteriserer det LTE fysiske laget er listet nedenfor. De to første er viderebeskrevet nedenfor:

- Multipel Aksess
- Fysiske kanaler og modulasjon
- Kanal koding og interleaving
- Fysiske lag prosedyrer
- Fysiske lag målinger

4.4.4.2.1. Multippel Aksess

Multippel aksess metoden for LTE fysiske laget er basert på: OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) med syklisk prefiks (CP) på nedlink, og SC-FDMA (Single Carrier – Frequency Division Multiple Access) med syklisk prefiks på opplink. For å støtte transmisjon i paret og ikke-paret spektrum, er to dupleks moduser aktuelle: FDD og TDD.

4.4.4.2.2. Fysiske kanaler og modulasjon

For å tilpasse lag-1 (figur 4.4-1) til ulike spektrumsallokeringer, er lag-1 definert gjennom ressursblokker. En ressursblokk spenner over enten 12 delbærere, hver med en $\Delta f = 15$ kHz båndbredde eller 24 delbærere som har båndbredde $\Delta f = 7.5$ kHz per enhet. Hver ressursblokken tilsvarende en tidslukeperiode på 0.5 ms. Antall SC-FDMA/OFDM symboler på en tidsluke avhenger av syklisk prefiks som har lengde konfigurert av høyere lag og er gitt i tabell 4.4-3. En tidsluke bruker 7 eller 6 SC-FDMA/OFDM symboler for normal CP eller utvidede CP, se tabell 4.4-3.

4.4.4.2.3. Opplink fysiske laget

Den minste ressursenheten for opplink transmisjoner betegnes som et ressurselement og er definert under i dette avsnittet.

1) Opplink tidslukestruktur og fysiske ressurser:

Signalet som overføres i hver tidsluka er beskrevet gjennom et ressursgitter (eng. grid) av $N_{RB}^{UL} N_{sc}^{RB}$ delbærere og N_{symb}^{UL} SC-FDMA symboler. Ressursgitter er illustrert på figur 4.4-2.

Ressurs Blokker:

Antall Ressursblokker i opplink, N_{RB}^{UL} , avhenger av opplink transmisjonsbåndbredde konfigurert i en celle. En ressursblokk er definert som N_{symb}^{UL} fortløpende SC-FDMA symboler i tidsdomenet, og N_{sc}^{RB} fortløpende delbærere i frekvensdomenet (tabell 4.4-3).

Configuration	N_{sc}^{RB}	N_{symb}^{UL}	CP-tidsperiode **
Normal CP	12	7	5.2 μ s (SC-FDMA symbol #0), 4.7 μ s (SC-FDMA symbol #1 - #6)
Extended CP	12	6	16.67 μ s (SC-FDMA symbol #0 - #5)

Tabell 4.4-3: Parametere for ressursblokk i LTE, ([16], table 5.2.3-1).

** Se fullstendig beregninga i delkapittel 4.4.4.2.7.

En fysiske ressursblokk i opplink består dermed av $(N_{symb}^{UL} \times N_{sc}^{RB})$ ressurselementer som tilsvarende en tidsluke i tidsdomenet og 180 kHz i frekvensdomenet. På grunn av at en LTE Ressursblokk (RB) har fast-lengde, skal en opplink oppfylle følgende: (legg merke til tidsenhet for alle beregninger gitt av $T_s = 1/(2048 * \Delta f)$).

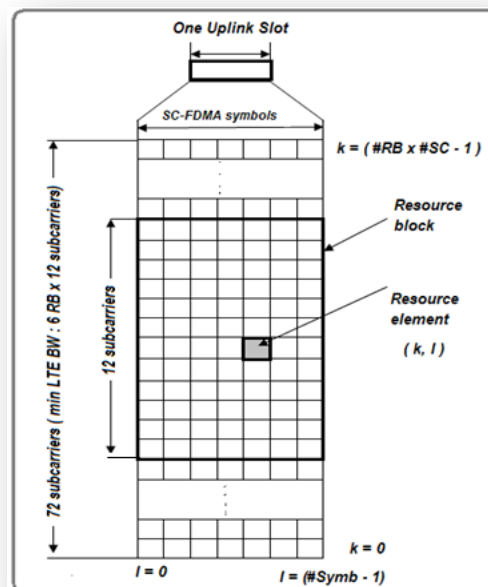
$$N_{RB}^{min,UL} \leq N_{RB}^{UL} \leq N_{RB}^{maks,UL}, \quad \text{der}$$

$N_{RB}^{min,UL} = 6$ og $N_{RB}^{maks,UL} = 110$ er den minste og største opplink båndbredden henholdsvis. Et sett over tillatelig verdier for UL N_{RB} er gitt ved [17], og beregnes på følgende måte:

$$N_{RB} = \frac{\text{Transmisjonsbåndbredde}}{\text{Ressurs blokk båndbredde}}, \quad N_{RB}^{min,UL} = \frac{1.4 \text{ MHz}}{180 \text{ kHz}} \approx \underline{6}, \quad N_{RB}^{maks,UL} = \frac{20 \text{ MHz}}{180 \text{ kHz}} \approx \underline{110} \quad (1)$$

Ressurs elementer:

Hvert element i det ressursrutenettet kalles for ressurselement og er entydig definert av indekspar (k, l) i en tidsluke, der $k = 0, \dots, (N_{RB}^{UL} N_{SC}^{RB} - 1)$ og $l = 0, \dots, (N_{symbol}^{UL} - 1)$ er indeksene i frekvens- og tidsdomenet henholdsvis. Ressurselementet (k, l) tilsvarer den komplekse verdien $a_{k,l}$. Mengder $a_{k,l}$ tilsvarende ressurselementer som ikke brukes av den fysiske kanalen eller av et fysisk signal for en tidslukes overføring skal som regel settes til null.



Figur 4.4-2: Ressurgitter med normal CP-lengde for LTE, [16].

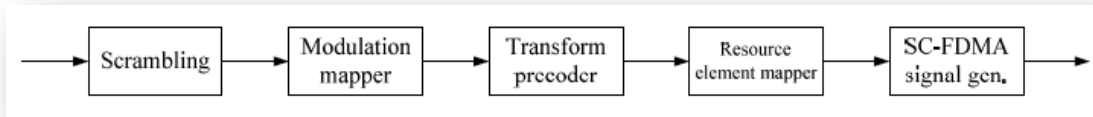
2) Opplink Fysiske kanaler

En opplink fysiske kanal tilsvarer et sett med ressurselementer som bærer informasjon opprinnelig fra høyere lag. Følgende opplink fysiskekanaler er definert:

- PUSCH (Physical Uplink Shared Channel)
- PUCCH (Physical Uplink Control Channel)
- PRACH (Physical Random Access Channel)

2.1) PUSCH: PUSCH bærer brukerdata for transmisjon. Det basisbåndssignalet som representerer PUSCH behandles av følgende enheter (se også figur 4.4-3):

- Kryptering eller miksing (eng. Scrambling) av data
- Modulasjon av krypterte databiter for å generere kompleksverdi symboler.
- Omforme prekodning for å generere kompleksverdi symboler.
- Avbildning (eng. Mapping) av kompleksverdi symboler til ressurselementer.
- Kompleksverdi generering av SC-FDMA-signal i tidsdomene for hver antennetilkopling (eng. Port).



Figur 4.4-3: Opplink fysiskekanal behandling for LTE, [16].

Modulasjonsavbildning:

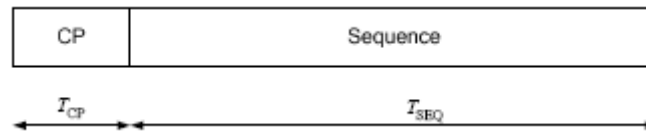
Den miksende blokken ved hjelp av "Scrambling" funksjonsblokk er avbildet til QPSK, 16-QAM eller 64-QAM konstellasjoner i PUSCH.

2.2) PUCCH: Det fysiske opplink styringskanalet (PUCCH) bærer opplink styringsinformasjon. PUCCH er aldri overført samtidig med PUSCH i den samme UE. For rammestruktur type-2 er den PUCCH ikke overført i UpPTS feltet. Hvis synkronisering er aktivert kan PUCCH utføre funksjoner som CQI, Scheduling forespørsel, H-ARQ, lavere modulasjoner og mer. PUCCH støtter fem formater:

PUCCH format	Modulation scheme	Number of bits per subframe, M_{bit}
1	N/A	N/A
1a	BPSK	1
1b	QPSK	2
2	QPSK	20
2a	QPSK+BPSK	21
2b	QPSK+QPSK	22

Tabell 4.4-4: PUCCH formater. De Formatene 2a og 2b er kun benyttet for normal CP [16].

2.3) PRACH: (*Tids og frekvensstruktur*) PRACH bærer den tilfeldige aksessprembelen vist på figur 4.4-4. Preambelen består av en CP med lengde T_{CP} og en del av sekvenslengde T_{SEQ} . Verdiene av parametere er listet i tabell 4.4-5, disse avhenger av ramme strukturen og randomaksess konfigurasjonen. Høyere lag styrer formatet av preambel.



Figur 4.4-4: Randomaksess preamble format [16].

Preamble format	T_{CP}	T_{SEQ}
0	$3168 \cdot T_s$	$24576 \cdot T_s$
1	$21024 \cdot T_s$	$24576 \cdot T_s$
2	$6240 \cdot T_s$	$2 \cdot 24576 \cdot T_s$
3	$21024 \cdot T_s$	$2 \cdot 24576 \cdot T_s$
4*	$448 \cdot T_s$	$4096 \cdot T_s$

* Frame structure type 2 and special subframe configurations with UpPTS lengths $4384 \cdot T_s$ and $5120 \cdot T_s$ only.

Tabell 4.4-5: Randomaksess preamble parametere. [16].

3) Fysiske signaler

Et fysiske signal benyttes i opplink fysiske lag. Dette bærer ingen informasjon opprinnelig fra høyere lag. Følgende opplink referansesignaler er definert:

3.1) Referanse signaler:

To type opplink referanse signaler støttes:

- Demodulasjon referansesignal assosieres med overføring av PUSCH eller PUCCH.
- Klang (eng.Sounding) referansesignal er ikke assosiert med overføring av PUSCH eller PUCCH.

4) SC-FDMA basisbånd signal generering:

Dette gjelder for alle opplink fysiske signaler og fysiske kanaler med unntak på den fysiske randomaksess kanalen (PRACH).

SC-FDMA symboler på en tidsluke skal overføres i økende rekkefølge av "l-bokstav", starting med $l = 0$, hvor tidspunktet for SC-FDMA-symbol med indeks $l > 0$ er gitt ved $\sum_{l'=0}^{l-1} (N_{CP,l'} + N) T_s$, innen en tidsluke. Tabellen nedenfor viser verdier av $N_{CP,1}$ som skal benyttes. Merk at ulike SC-FDMA symboler i en tidsluke kan ha ulike sykliske prefikslengder.

Configuration	Cyclic prefix length $N_{CP,1}$
Normal cyclic prefix	160 for $l = 0$ 144 for $l = 1, 2, \dots, 6$
Extended cyclic prefix	512 for $l = 0, 1, \dots, 5$

Tabell 4.4-6: Syklisk Prefiks i SC-FDMA, ([16], Table 5.6-1).

4.4.4.2.4. SC-FDMA moduleringsparametere for LTE

Bandwidth (MHz)		1.4	3	5	10	15	20
Parameter	FFT Size	128	256	512	1024	1536	2048
	Sampling Rate: (MHz)	1.92 (1/16xT _s)	3.84 (1/8 x T _s)	7.68 (1/4 x T _s)	15.36 (1/2 x T _s)	23.04 (3/4 x T _s)	30.72 =(8x3.84)
	Number of subcarriers	72	180	300	600	900	1200
	Number of RB	6	15	25	50	75	100

Tabell 4.4-7: SC-FDMA moduleringsparametere for LTE opplink, ([18], s.352).

Legg merk til den basiske tidsenheten for alle LTE-spesifikasjoner hvilket alle andre tidsperiodene er multipler av. Den er definert ved $T_s = 1/30.72$ [μ s]. Tidsenheten er valgt for å opprettholde kompatibilitet med nåværende teknologier. Husk at chipraten for UMTS er 3.84 MHz.

4.4.4.2.5. Nedlink fysiske laget

LTE nedlink sendinger fra basestasjon (som kalles eNodeB) består av brukerdata og styringsdata fra høyere lag i protokollstakken. Data er så multiplekser sammen med fysiske lags signalering for å støtte dataoverføring. OFDMA forenkler multipleksing av disse ulike delene av nedlink signalet, og muliggjør at nedlink signalet deles inn i mindre frekvens- og tidsenheter.

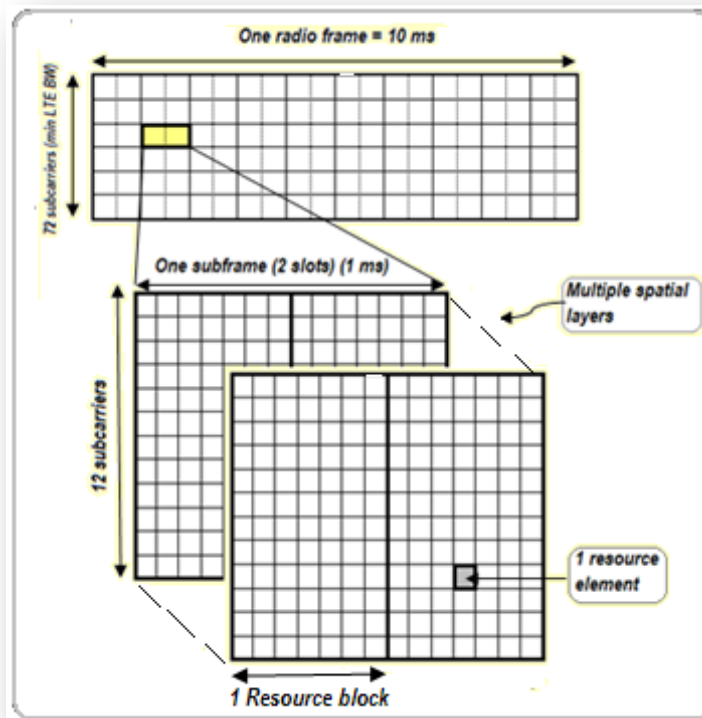
Den minste tids-frekvensenheten for nedlink transmisjon betegnes som et ressurselement (RE) og er definert under i dette delkapitlet.

1) Sendingsressurs struktur

Tids- frekvensressurser er delt inn etter følgende struktur:

Tidsdomene : Den største tidsenheten er en radoramme på 10 ms. Den er inndelt videre i ti delrammer med 1 ms (dvs. 10 delrammer \times 1ms). Hver delramme er delt igjen i to 0.5 ms tidsluker. Hver tidsluka består av 7 OFDM symboler for normal syklisk prefikset (CP) lengde, eller 6 hvis det utvidede sykliske prefikset er konfigurert i celle.

Frekvensdomene : I frekvensdomenet er ressurser gruppert i enheter av 12 delbærere – som tar opp $(15 \text{ kHz} \times 12) = 180 \text{ kHz}$ – slik at en gruppe av 12 delbærere i én tidsluke er kalt for ressurselement (RE). Den minste enheten innenfor ressurselementet betegnes for ressurselement (RE). Dette ressurselementet består av én delbærer i én OFDM-symbolperiode. Dermed består en ressurselement av 84 ressurselementer ved å benytte seg av normal CP lengden, og 72 ressurselementer hvis det utvidede CP-et er konfigurert i cellen. Prinsippet er illustrert ved figur 4.4-5.



Figur 4.4-5: Tids- frekvensressurser med normal CP [18].

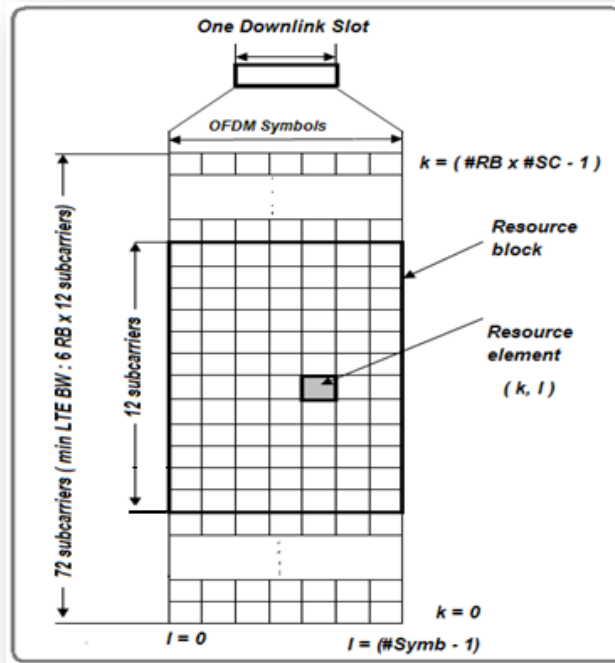
Innen visse ressursblokker er noen ressurselementer reservert for spesielle formål: synkroniseringssignaler, referanse signaler, styringssignaler og kritisk kringkasting (broadcast) systeminformasjon. De resterende ressurselementene benyttes for dataoverføring, og er vanligvis allokert i ett par av RB (altså to tidsluker).

2) Nedlink tidslukestruktur og ressurselementer

Signalet som overføres i hver tidsluka er beskrevet gjennom et ressursgitter (eng. grid) av $N_{RB}^{DL} N_{sc}^{RB}$ delbærere og N_{symp}^{DL} SC-FDMA symboler. Strukturen er vist i figur 4.4-6.

3) Ressursblokker:

Antall Ressursblokker i nedlink, N_{RB}^{DL} , avhenger av nedlink transmisjonsbåndbredde konfigurert i cellen. Ressursblokker benyttes for å beskrive avbildning av noen fysiske kanaler til ressurselementer. For nedlink er to type ressursblokker definert: *fysiske* og *innbilte* ressursblokker.



Figur 4.4-6: Nedlink ressursgitter med normal CP konfigurasjon [16].

En fysiske ressursblokk er definert som N_{symb}^{DL} fortløpende OFDM-symboler i tidsdomenet og N_{sc}^{RB} fortløpende delbærere i frekvensdomenet. Likesom SC-FDMA er antall OFDM-symboler avhengig av CP-lengde og delbærere mellomrom (se tabell 4.4-8).

Konfigurasjon	Δf (kHz)	N_{sc}^{RB}	N_{symb}^{DL}
Normal CP	15	12	7
Utvidede CP	15		6
Brukt for MBMS	7.5	24	3

Tabell 4.4-8: Fysiske ressursblokker parametere for nedlink, ([16], table 6.2.3-1).

En fysiske ressursblokk i nedlink består dermed av $(N_{symb}^{DL} \times N_{sc}^{RB})$ ressurselementer som tilsvarer én tidsluke i tidsdomenet og 180 kHz i frekvensdomenet. På grunn av at en LTE Ressursblokk har fast-lengde, skal en nedlink oppfylle følgende: (legg merke til systemets tidsenheten gitt av $T_s = 1/(2048 * \Delta f)$).

$$N_{RB}^{min,DL} \leq N_{RB}^{DL} \leq N_{RB}^{maks,DL}, \quad \text{der}$$

$N_{RB}^{min,DL} = 6$ og $N_{RB}^{maks,DL} = 110$ er den minste og største nedlink båndbredden henholdsvis. Et sett over tillatet verdier for DL N_{RB} er gitt ved [17], og beregnes på flg måte:

$$N_{RB} = \frac{\text{Transmisjonsb \u00e5ndbredde}}{\text{Ressurs blokk b\u00e5ndbredde}}, \quad N_{RB}^{min,DL} = \frac{1.4 \text{ MHz}}{180 \text{ kHz}} \approx \underline{6}, \quad N_{RB}^{maks,DL} = \frac{20 \text{ MHz}}{180 \text{ kHz}} \approx \underline{110}$$

For multi-antenne transmisjon er et ressursgitter definert per antennetilkopling. En antenneport eller tilkopling er definert av tilhørende referansesignal. Sett med antenneporter som støttes avhenger av referansesignal som er konfigurert i celle:

- Celle-spesifikke referansesignaler, de er assosiert med ikke-MBSFN transmisjon.
- MBSFN referansesignaler, disse er assosiert med MBSFN transmisjon.
- UE-spesifikke referansesignaler.

4) Ressurselementer:

Hvert element i det ressursgitteret kalles for et ressurselement og er entydig definert av indeksparet (k, l) i en tidsluke, der $k = 0, \dots, (N_{RB}^{DL} N_{sc}^{RB} - 1)$ og $l = 0, \dots, (N_{symbol}^{DL} - 1)$ er indeksene i frekvens- og tidsdomener henholdsvis. Ressurselementet (k, l) tilsvarer den komplekse verdien $a_{k,l}^{(p)}$. Indeks p kan godt droppes når det er ingen risiko om forvirring, eller ingen spesiell antenneport er spesifisert. Mengder $a_{k,l}$ tilsvarende ressurselementer som ikke brukes av fysiske kanal eller av et fysiske signal for en tidsluke overføring skal settes til null.

En virtuelle eller innbilte ressursblokk er av same størrelse som en fysiske ressursblokk. To typer av innbilte ressursblokker er definert:

- Lokaliserte Virtuell ressursblokker av type *lokaliserte*
- Virtuell ressursblokker av type *distribuerte*

For hver av virtuelle ressursblokker er et par virtuelle ressursblokker over to tidsluker i en delramme allokert, samt et enkelt virtuelle ressursblokk nummer, n_{VRB} .

5) Nedlink ressursblokker for LTE

Sendings båndbredde (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Antall OFDM symboler	7 (6 for Extended CP)					
Delbærere-mellomrom (kHz)	15 (7.5 for MBSM CP)					
Fysiske Ressursblokker-PRB, (kHz)	180					
Antall besatt delbærere	72	180	300	600	900	1200
Antall tilgjengelig PRB	6	15	25	50	75	100

Tabell 4.4-9: Nedlink fysiske ressurser vs båndbredder. Se delkapittel 4.5.2 for definisjon av verdier i tabellen. Data delbærere er gitt ved: $(12 \times \text{PRB})$ [22] [17].

6) Fysiske signaler:

Et nedlink fysiske signal tilsvarer et sett med ressurselementer som benyttes av fysiske lag, men signalet bærer ingen informasjon opprinnelig fra høyere lag. Følgende nedlink fysiske signaler er definert:

6.1) Referanse signal

- Celle-spesifikke referanse signaler som er assosiert med ikke-MBSFN overføring.
- MBSFN referanse signaler er assosiert med MBSFN overføring.
- UE-spesifikke referanse signaler.

6.2) Synkroniseringssignal

- Primær synkroniseringssignal
- Sekundær synkroniseringssignal

7) Sikkerhetsperioden (eng. Guard periode) for Halv-FDD modus

For Halv-FDD modusen er en sikkerhetsperiode opprettet av UE-en ved å ikke motta den siste delen av en nedlink delramme umiddelbart før en opplink delramme fra samme UE.

8) Sikkerhetsperiode (Guard Periode) for TDD modus

For ramme struktur type-2, gjelder GP-feltet fra figur 4.4-9 som en sikkerhetsperiode.

9) Generelle struktur for nedlink fysiske kanaler

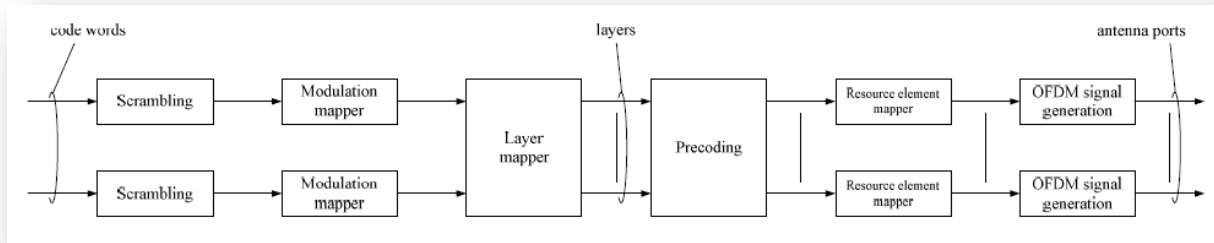
En fysiske nedlink kanal tilsvarer et sett med ressurselementer som bærer informasjon opprinnelig fra høyere lag og har grensesnittet definert mellom [16] og [19]. Følgende fysiske nedlink-kanaler er definert:

- PDSCH (Physical Downlink Shared Channel)
- PBCH (Physical Broadcast Channel)
- PMCH (Physical Multicast Channel)
- PCFICH (Physical Control Format Indicator Channel)
- PDCCH (Physical Downlink Control Channel)
- PHICH (Physical Hybrid ARQ Indicator Channel)

Signalet for basisbånd som representerer en nedlink fysiske kanal er definert i form av flg: Hver datablokk er først beskyttet mot feil ved sending, vanligvis først med en CRC (Cyclic Redundancy Check), og deretter med kanalkoding.

- a) - Kryptering eller miksing (eng. Scrambling) : det første trinnet benyttes av alle nedlink fysiske kanaler, og har som formålet interferens avvisning.
- b) - Modulasjon av krypterte biter for å generere kompleksverdi moduleringsymboler.
- c) - Avbildning (eng. Mapping) av modulerte kompleksverdi symboler til en eller ulike transmisjonslag.

- d) - Prekoding av modulerte kompleksverdi symboler på hvert lag for overføring til antenneporter.
- e) - Avbildning av modulerte kompleksverdi symboler for hver antenneport til ressurselementer.
- f) - Generering av kompleksverdi OFDM signal i tidsdomene for hver antenne tilkopleing (eng. Port).



Figur 4.4-7: Oversikt over nedlink fysiske kanalbehandling, [16].

- **Modulasjon:**

For hvert kodeord skal krypterte blokk av biter moduleres ved bruk av en eller andre modulasjonsmetode listet ned i tabell 4.4-10. Resultaten etter modulasjon er en modulerte blokk av kompleksverdi symboler.

Physical channel	Modulasjonsmetode
PDSCH	QPSK, 16QAM, 64QAM
PMCH	QPSK, 16QAM, 64QAM

Tabell 4.4-10: Modulasjonsmetoder for nedlink PDSCH og PMCH kanaler.

PDSCH: PDSCH skal behandles og avbildes til ressurselementer, og prosyderen er matematisk beskrevet i ([16] delkapittel 6.3). Den fysiske nedlink delte kanalen brukes for data og multimedia tjenesteoverføring, dette krever modulasjonsmetoder for høyere datarater, (se tabell 4.4-10).

PMCH: Dette er fysiske multicast kanalen. Ingen senderdiversitets metode er spesifisert. Lag avbildning (eng. Layer mapping) og prekoding (se figur 4.4-7) skal realiseres forutsatt at en enkelt antenneport, i dette tilfellet nummer 4 skal brukes for transmisjonen. Tabell 4.4-10 viser modulasjonssjema for PMCH.

PBCH: Kanalen bærer paging og signalering for styringsinformasjon. Antall biter overførte gjennom PBCH er 1920 for normal CP og 1728 for utvidede CP. Informasjonen er kryptert med en celle-spesifikk sekvens før den moduleres med QPSK.

PCFICH: Kanalen bærer informasjon om antall OFDM symboler benyttet for PDCCH-ene sendingen i en delramme. Modulasjonsskjema er QPSK.

PDCCH: Fysiske nedlink kanalstyring, bærer kanalfordelings parametere og andre styringsinformasjon. En fysiske styringskanal er overført i en aggregat av én eller flere fortløpende styringskanal elementer (CCE-er), hvor et styringskanal element tilsvarer på 9 ressurselement-gruppe. Modulasjonsskjema for PDCCH er QPSK. Flere nedlink styringskanaler kan overføres i en delramme:

PDCCH format	Number of CCEs	Number of resource-element groups	Number of PDCCH bits
0	1	9	72
1	2	18	144
2	4	36	288
3	8	72	576

Tabell 4.4-11: PDCCH formater [16].

PHICH: Kanalen bærer hybrid-ARQ ACK/NAK. Flere PHICH-er avbildet til samme sett av ressurselementer utgjør en PHICH gruppe, der PHICH-er innen samme PHICH gruppe er separert gjennom ulike ortogonale sekvenser. Den Fysiske hybrid ARQ indikator kanalen bruker BPSK som modulasjonsmetode.

10) OFDM basisbånd signal generering:

OFDM symboler i en tidsluke skal overføres i økende rekkefølge av " l-bokstav ", starting med $l = 0$, hvor OFDM symbol som er slik at $l > 0$ starter i tidspunkt definert ved $\sum_{l'=0}^{l-1} (N_{CP,l'} + N) T_s$, innen en tidsluke. Variabelen $N=2048$ for delbærere mellomrommet $\Delta f = 15$ kHz og 4096 for delbærere mellomrommet $\Delta f = 7.5$ kHz (se figur 4.4-6).

De(t) første OFDM-symboler(t) i en tidsluke benytter en normal-CP og resten av OFDM-symboler bruker utvidede CP. Startposisjonen for OFDM symboler med utvidede CP skal være identisk med disse i en tidsluke der alle OFDM symboler bruker utvidede CP. Derfor vil det være en del av tidsluke mellom de to CP-ene regionene hvor overført signal ikke er definert.

Tabellen nedenfor viser verdier av $N_{CP,1}$ som skal benyttes. Merk at ulike OFDM symboler i en tidsluke i noen tilfeller kan ha ulike sykliske prefikslengder.

Configuration		Cyclic prefix length $N_{CP,1}$	
Normal CP	$\Delta f = 15$ kHz	T_s (standard time units)**	$T_{\mu\text{sec}}$
		160 for $l = 0$	5.21 for $l = 0$
		144 for $l = 1, 2, \dots, 6$	4.69 for $l = 1, 2, \dots, 6$
Extended CP	$\Delta f = 7.5$ kHz	512 for $l = 0, 1, \dots, 5$	16.67
		1024 for $l = 0, 1, 2$	33.33
		1024 for $l = 0, 1, 2$	33.33

Tabell 4.4-12: Parametere for OFDM signal, ([16], table 6.12-1).

** Se avsnitt 4.4.4.2.7 for detaljert info (regneverk).

4.4.4.2.6. OFDMA moduleringsparametere for LTE

		Båndbredde (MHz)						
		1.4	3	5	10	15	20	
Parametere	FFT Størrelse	128	256	512	1024	1536	2048	
	Samplingsrate (MHz)	1.92 (1/16)xT _s	3.84 (1/8) x T _s	7.68 (1/4) x T _s	15.36 (1/2) x T _s	23.04 (3/4) x T _s	30.72 =(8x3.84)	
	Delbærere-mellomrom (kHz)	15						
	Antall OFDM symboler/tidsluke	7 for normal CP 6 for Utvidede CP						
	Antall delbærere	73	181	301	601	901	1201	
	CP lengde (μs/sample)	Normal	(4.69/9) x 6, (5.21/10) x 1	(4.69/18) x 6, (5.21/10) x 1	(4.69/36)x 6, (5.21/40)x 1	(4.69/72) x 6, (5.21/80) x 1	(4.69/ 108)x 6, (5.21/ 120)x 1	(4.69/ 144)x 6, (5.21/ 160)x 1
			Utvidede	16.67/32	16.67/64	16.67/ 128	16.67/256	16.67/ 512

Tabell 4.4-13: OFDMA parametere for LTE nedlink [41]. Beregninger basert på normal CP.

Legg merk til den basiske tidsenheten for alle LTE-spesifikasjoner hvilket alle andre tidsperiodene er multipler av. Den er definert ved $T_s = 1/30.72$ [μs]. Tidsenheten er valgt for å opprettholde kompatibilitet med nåværende teknologier. Chipraten for UMTS er 3.84 MHz.

4.4.4.2.7. LTE radiatoramme og Tidsluke strukturer

1) Radioramme struktur

Gjennom [36.200 serier], er størrelsen på ulike felter i tidsdomenet uttrykt som en antall

$$\text{tidsenhet } T_s = \frac{1}{BW \text{ spacing} \times 2048} = \frac{1}{15000 \times 2048} \approx 32552 \text{ } \mu\text{s}. \text{ Dette tilsvarer på } 30.72 \text{ MHz}$$

samples klokkeslet når 2048 FFT-punkter og BW på 20 MHz system benyttes.

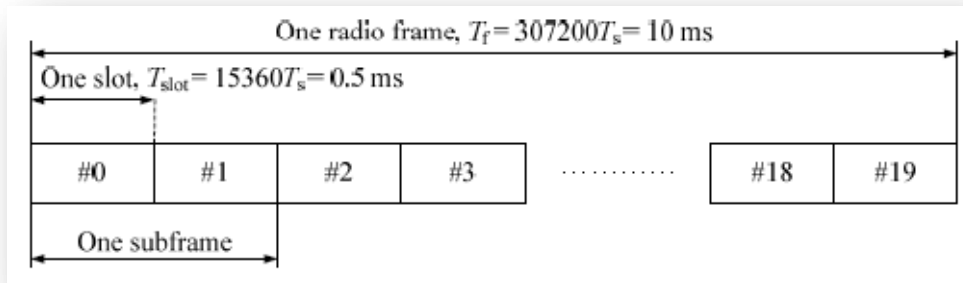
Nedlink og opplink sendinger er organisert i radiatorammer med varighet av $T_{\text{frame}} = 307200 \times T_s = 10$ ms. LTE støtter to type radiatorammer:

- Type 1, som gjelder for FDD
- Type 2, som gjelder for TDD.

1.1) Radioramme type 1

Radiatoramme struktur type 1 gjelder for både full dupleks og halv-dupleks FDD. Hver radiatoramme av lengde $T_f = 307200 \times T_s = 10$ ms består av 20 tidsluker med lengde $T_{\text{slot}} = 15360 \times T_s = 0.5$ ms, nummerert fra 0 til 19. En delramme er definert som to fortløpende tidsluker der delramme i består av tidsluker $2i$ og $2i + 1$.

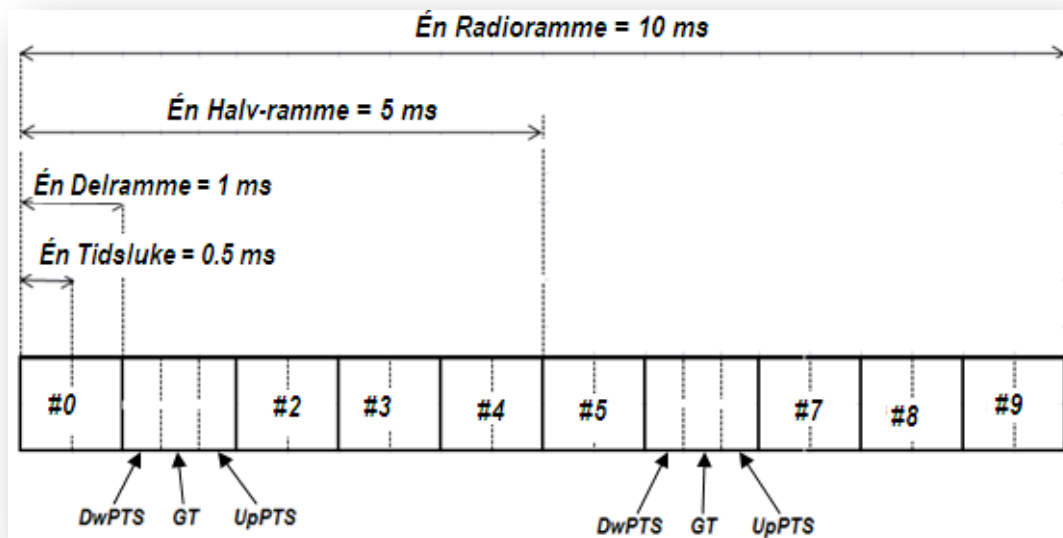
For FDD er 10 delrammer tilgjengelige for nedlink sendinger og 10 delrammer er tilgjengelige for opplink sendinger i hver 10 ms intervall. Opplink og nedlink sendinger er atskilt i frekvensdomenet. I halv-dupleks (H-FDD) kan UE ikke sende og motta samtidig mens i full dupleks FDD er det ingen definert randsone.



Figur 4.4-8: Rammestruktur for FDD-type 1, [16]. Delrammelengde tilsvarende én TTI.

1.2) Radioramme type 2

Ramme struktur type 2 er anvendbar til TDD. Hver radioramme av lengde $T_f = 307200 \times T_s = 10$ ms består av 2 halv-rammer hver på $T_{hf} = 153600 \times T_s = 5$ ms lengde. Videre består hver halv-ramme av 5 delrammer (eng. Subframes) med lengde av $T_{slot} = 30720 \times T_s = 1$ ms.



Figur 4.4-9: Rammestruktur for TDD-type 2.

Tabell 4.4-14 viser mulige opplink-nedlink konfigurasjoner. Hver delramme i en radioramme, 'D' betegner en reservert delramme for nedlink sendinger, 'U' betegner en reservert delramme for opplink sendinger, og 'S' betegner en spesiell delramme med de 3 feltene DwPTS, GP og UpPTS. Total lengden for alle disse 3 feltene er: $30720 \times T_s = 1$ ms. Hver delramme i består av 2 tidsluker, $2i$ og $(2i + 1)$, der hver tidsluka er på $T_{slot} = 15360 \times T_s = 0.5$ ms lengde for hver delramme.

Uplink-downlink configuration	Downlink-to-Uplink Switch-point periodicity	Subframe number									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 ms	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 ms	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 ms	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 ms	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10 ms	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Tabell 4.4-14: Opplink-nedlink oppsetting [16].

Det er to DL-til-UL omkoplingspunkter som er ved 5 ms og 10 ms. Ved 5 ms DL-til-UL omkoplingspunkt periodisiteten, er den spesielle delrammen plassert i begge halv-rammer (DL og UL). Ved 10 ms eksisterer kun ett omkoplingspunkt og plasseres på den første halv-rammen (DL). Delrammer 0 og 5 og DwPTS er alltid reservert for nedlink transmisjon. UpPTS og delrammer som står umiddelbart etter de spesielle delrammene er alltid reservert for opplink transmisjon.

2) SC-FDMA delrammer struktur etter CP-type for opplink:

Det er referert over at ulike LTE SC-FDMA symboler i en tidsluke kan ha ulike sykliske prefikslengder. Tabellen 4.15 illustrerer forskjellige CP-lengder etter symbolsplassering i en tidsluke og etter CP-type. Følgende viser beregninger:

(fra tabell 4.4-6 og tabell 4.4-3)

Normal CP ($\Delta f = 15$ kHz, 7 SC-FDMA symboler, og 12 delbærebølger / PRB):

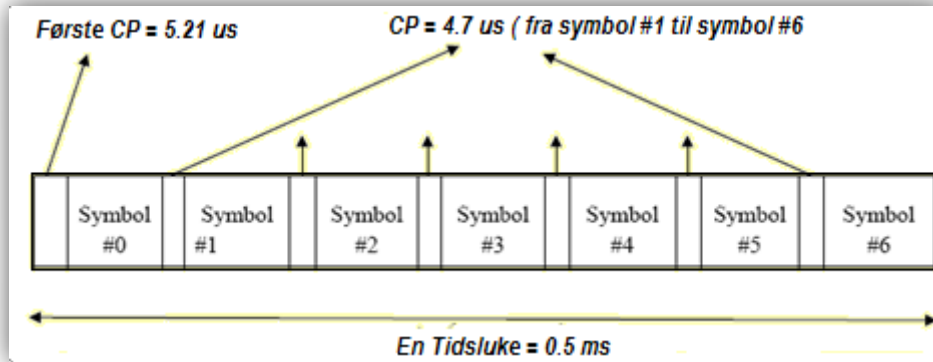
$$\text{SC-FDMA symbol \#0:} \quad T_{\text{CP}} = 160 \times T_s = 160 \times \frac{1}{15000 \text{ Hz} \times 2048} \approx \underline{5.21 \mu\text{s}}$$

$$\text{SC-FDMA symboler \#1 - \#6:} \quad T_{\text{CP}} = 144 \times T_s \approx \underline{4.69 \mu\text{s}}$$

$$T_{\text{CP/slot}} = (1 \times 5.21 \mu\text{s}) + (6 \times 4.69 \mu\text{s}) = \underline{33.33 \mu\text{s}}$$

$$T_{\text{symb}} = \frac{1}{15000 \text{ Hz}} = \underline{66.67 \mu\text{s}}$$

$$T_{\text{slot}} = (T_{\text{symb}} \times 7) + T_{\text{CP/slot}} = \underline{0.5 \text{ ms}}$$



Figur 4.4-10: Opplink tidslukestruktur med 7 SC-FDMA-symboler og normal-CP oppsetting.

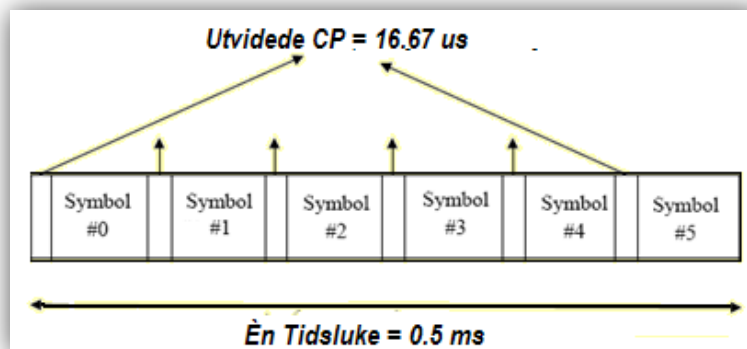
Utvidede CP ($\Delta f = 15$ kHz, 6 SC-FDMA symboler, og 12 delbærebølger / PRB):

$$\text{SC-FDMA symbol (\#0 - \#5):} \quad T_{\text{CP}} = 512 \times T_s = 512 \times \frac{1}{15000 \text{ Hz} \times 2048} \approx 16.67 \mu\text{s}$$

$$T_{\text{CP/slot}} = 6 \times 16.67 \mu\text{s} = 100.02 \mu\text{s}$$

$$T_{\text{symb}} = \frac{1}{15000 \text{ Hz}} = 66.67 \mu\text{s}$$

$$T_{\text{slot}} = (T_{\text{symb}} \times 6) + T_{\text{CP/slot}} = \underline{\underline{0.5 \text{ ms}}}$$



Figur 4.4-11: Opplink tidsluke struktur med 6 SC-FDMA-symboler.

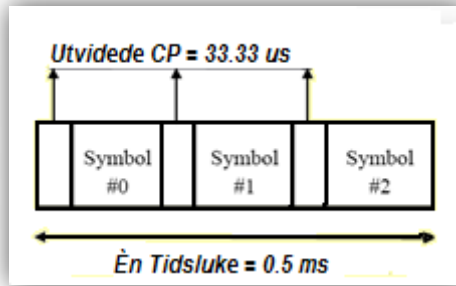
3) OFDM delrammer oppsetting etter CP-type for nedlink:

(fra tabell 4.4-8 og tabell 4.4-12)

Normal og Utvidede CP:

I normal CP konfigurasjon for nedlink (OFDMA) defineres delrammer i to størrelser: sju og seks OFDM-symboler for ($\Delta f = 15$ kHz, 12 SC/PRB). Derfor er normal og utvidede CP for SC-FDMA det samme som for normal CP og utvidede oppsetting i OFDM. Slik at alle resultater for SC-FDMA delrammer oppsetting gjelder også her for OFDM tilfellet.

Benyttes for MBMS ($\Delta f = 15$ kHz eller 7.5 kHz, 3 OFDM symboler, 24 delbærebølger/PRB)



Figur 4.4-12: Nedlink tidslukestruktur med utvidede CP. Tre OFDM-symboler tilgjengelige for MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Service) transmisjon.

$$\text{OFDM symbol (\#0 - \#3):} \quad T_{CP} = 1024 \times T_s = 1024 \times \frac{1}{7500 \text{ Hz} \times 4096} \approx \underline{33.33 \mu\text{s}}$$

$$T_{CP} = 1024 \times T_s = 1024 \times \frac{1}{15000 \text{ Hz} \times 2048} \approx \underline{33.33 \mu\text{s}}$$

$$T_{CP/\text{slot}} = 3 \times 33.33 \mu\text{s} = \underline{100 \mu\text{s}}$$

$$T_{\text{symb}} = \frac{1}{7500 \text{ Hz}} = \underline{133.33 \mu\text{s}}$$

$$T_{\text{slot}} = (T_{\text{symb}} \times 3) + T_{CP/\text{slot}} = \underline{0.5 \text{ ms}}$$

4) Spesiell delramme (DwPTS, GP og UpPTS) for TDD:

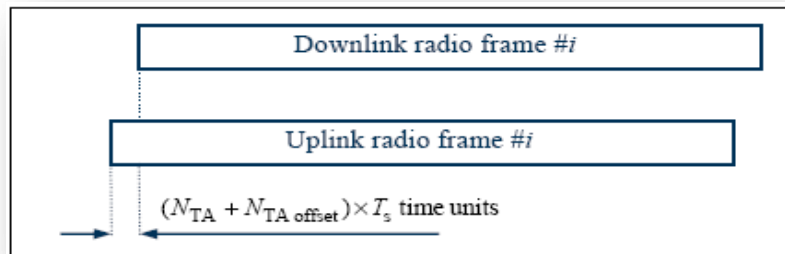
Tabell 4.4-14 illustrerer plassering for det Spesielle delrammet ” S ” med sine tre feltene (DwPTS, GP, og UpPTS) i en tidsluke. Lengden av DwPTS og UpPTS er gitt på tabell 4.4-15, og den totale delrammelengden med GP inkludert skal være lik: $30720 \times T_s = 1 \text{ ms}$.

Spesiell delramme konfigurasjon	Normal CP nedlink			Utvidede CP opplink		
	DwPTS	UpPTS		DwPTS	UpPTS	
		Normal CP i UL	Utvidede CP i UL		Normal CP i UL	Utvidede CP i UL
0	6592 T_s	-	-	7680 T_s	-	-
1	19760 T_s	-	-	20480 T_s	2192 T_s	2560 T_s
2	21952 T_s	2192 T_s	2560 T_s	23040 T_s	-	-
3	24144 T_s	-	-	25600 T_s	-	-
4	16336 T_s	-	-	7680 T_s	-	-
5	6592 T_s	-	-	20480 T_s	4384 T_s	5120 T_s
6	19760 T_s	4384 T_s	5120 T_s	23040 T_s	-	-
7	21952 T_s	-	-	-	-	-
8	24144 T_s	-	-	-	-	-

Tabell 4.4-15: Konfigurasjon av Spesielle delrammer, ([16], table 4.2-1).

4.4.4.3. Opplink-Nedlink ramme synkronisering

Overføring av opplink radiatoramme nummer "i" fra UE-en skal starte $(N_{TA} + N_{TA\ offset}) \times T_s$ sekunder før start av tilsvarende nedlink radiatoramme på UE-en, der $0 \leq N_{TA} \leq 20512$, $N_{TA\ offset} = 0$ for rammestruktur type-1 og $N_{TA\ offset} = 624$ for rammestruktur type-2. Merk at ikke alle tidsluker i et radiatoramme kan bli overført. Et eksempel er TDD, hvor bare en del av tidsluker i et radiatoramme blir overført.

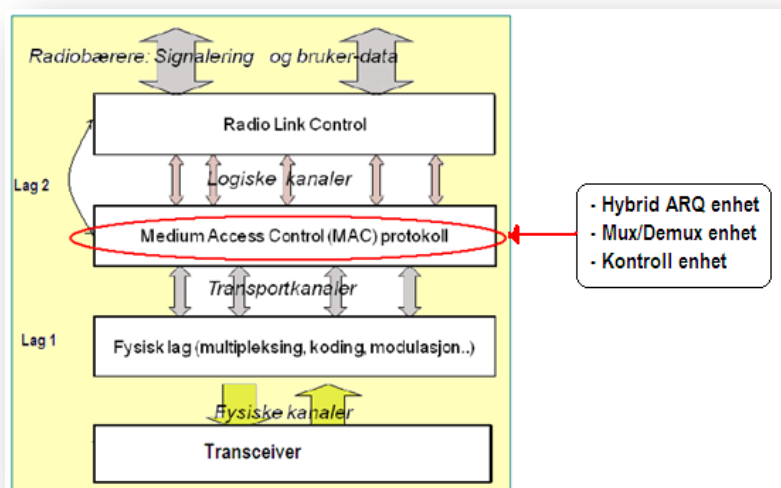


Figur 4.4-13: Opplink-nedlink synkroniseringsforhold [16].
 $T_s = 1/(2048 * \Delta f)$ for en normal CP oppsetting.

4.4.5. LTE MAC laget

4.4.5.1. MAC arkitektur

MAC (Medium Access Control) og RLC (Radio Link Control) danner begge lag-2 i LTE radio protokollstakk, og disse to sammen med fysiske lag utgjør radioaksess-protokollene. MAC-laget utfører multipleksing av data fra ulike radio bærere. Tilkoblingen fra MAC til det fysiske laget er gjennom transport kanaler, og tilkoblingen fra MAC til RLC-laget er gjennom logiske kanaler, (se figur 4.4-14).



Figur 4.4-14: Generelle protokollarkitektur for radionett [42]. MAC håndterer blant annet aksessen til krontrollkanaler og er nødvendig for å koble opp en samtale eller regulere hvem og hvor mange som aksesserer nettet.

4.4.5.2. MAC kanaler

E-UTRA definerer to MAC-enheter: en i UE-en og en i E-UTRAN. Disse MAC Enheter håndterer følgende:

- 1) **Transport kanaler:** Data er multiplexert i transport kanaler avhengig av hvordan den overføres via radiogrensesnitt (f.eks. kanal koding, interleaving, osv) :

- 1.1) **Nedlink:**

BCH : Broadcast Channel - Kanalen benyttes for å overføre deler av systeminformasjon som er viktig for aksess til DL-SCH. Informasjonen sendes til alle mobile i en celle.

DL-SCH : Downlink Shared Channel - Benyttes for å overføre brukerdata eller kontroll-meldinger. I tillegg, strekker "hånd" til BCH for å overføre rest av systeminformasjon som ikke er overført via BCH.

PCH : Paging Channel - Benyttes for å overføre paging informasjon til UE-er. Kanalen er også brukt for å varsle UE-er om oppdatering av systeminformasjon.

MCH : Multicast Channel - Benyttes for å overføre brukerdata eller kontroll-meldinger som krever MBSFN (Multimedia Broadcast Single Frequency Network).

- 1.2) **Opplink:**

UL-SCH : Uplink Shared Channel - Benyttes for å overføre opplink brukerdata eller kontroll-meldinger.

RACH : Random Access Channel - Benyttes for aksess til nettverk når UE-en ikke har nøyaktig opplink synkroniseringstiming, eller UE-en ikke er allokert opplink sender-ressurser.

De nøyaktige funksjonene som utføres av MAC-enheter er forskjellige i UE fra disse som utføres i E-UTRAN.

- 2) **Logiske kanaler:** MAC-laget realiserer radiobærere (data overføringstjenester for RLC) gjennom å utnytte ulike logiske kanaler. Den logiske kanalen er enten styringslogiske kanaler som f.eks. RRC signalering, eller trafikk-logiske-kanaler som bærer brukerdata:

- 2.1) **Styrings logiskekanaler:**

BCCH : Broadcast Control Channel (DL) - Kanalen benyttes på nedlink for å kringkaste informasjon knyttet til system.

PCCH : Paging Control Channel (DL) - Nedlink kanal som benyttes for å varsle UE-er om innkommende anrop eller en endring av informasjon i system.

CCCH : Common Control Channel (DL/UL) - Kanalen benyttes for å levere kontrollinformasjon i begge retninger når det ikke er noen bekreftet assosiasjon mellom en UE og eNodeB – f.eks. i løpet av en forbindelse etablering.

MCCH : Multicast Control Channel (DL) - Nedlink kanal som benyttes for å overføre kontrollinformasjon beslektet til mottakelse av MBMS tjenester.

DCCH : Dedicated Control Channel - Kanalen benyttes for å overføre dedikerte styringsinformasjon tilknyttet en spesifikk UE, (UL/DL)

2.2) **Traffic logiskekanaler:**

DTCH : Dedicated Traffic Channel - Benyttes for å overføre dedikerte brukerdata i både UL og DL retninger.

Multicast Traffic Channel: benyttes for å sende brukerdata for MBMS tjenester (DL).

4.4.5.3. MAC Tjenester

- **Tjenester levert til høyere lag:**

- Data viderekopling
- Radioressurs allokering

- **Tjenester forventet fra fysisk lag:**

- Data viderekoplings tjenester
- Signalering av HARQ tilbakekopling
- Signalering av kanalfordeling (scheduling) forespørsel
- Målinger (f.eks. CQI – Channel Quality Indication)

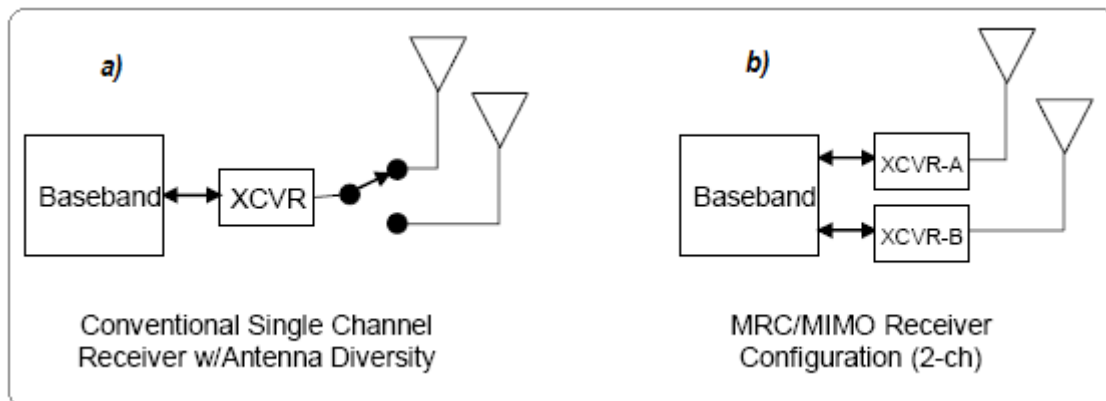
4.4.5.4. MAC funksjoner

- MAC-laget utfører både multipleksing og demultipleksing mellom logiske og transport kanaler, dvs. På senders side konstruerer MAC PDU-er (som kalles transport blokker) ut fra MAC SDU-er (som overføres gjennom logiske kanaler). MAC-laget i den mottakers siden gjenvinner MAC SDU-er fra MAC PDU-er mottatte gjennom transport kanaler;
- Rapport om kanalfordelings (eng. Scheduling) informasjon;
- Feil korrigering gjennom HARQ;
- Prioritetshåndtering mellom UE-er ved hjelp av dynamisk kanalfordeling;
- Logiske kanaler prioritering;
- Utvalg av MAC PDU (transport) formatet.
- Random aksess prosedyrer
- Opplink trimming (eng. timing alignment).

4.4.5.5. MIMO og MRC i 3GPP LTE

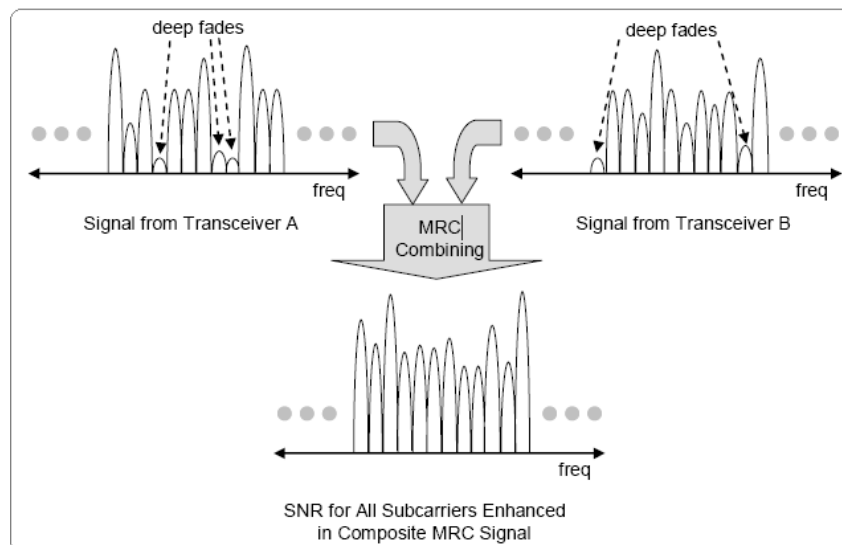
LTE fysiske laget kan eventuelt utnytte flere mottakere både på basestasjon (eNodeB) og mobilstasjon for å styrke link robusthet og øke datarater for LTE nedlink eller opplink. Det er viktig å merke forskjellen mellom en mottaker-diversitet og en MIMO teknologi. En MRC (maximal ratio combining) brukes til å styrke link pålitelighet i utfordrende

utbredelsesforhold når signalstyrken er lav eller/og tilstedeværelse av flerveis utbredelse. MIMO derimot, er en relatert teknikk som brukes for å øke datarater i et system.



Figur 4.4-15: MRC vs MIMO. Operasjon krever flere sender-mottakere, [13].

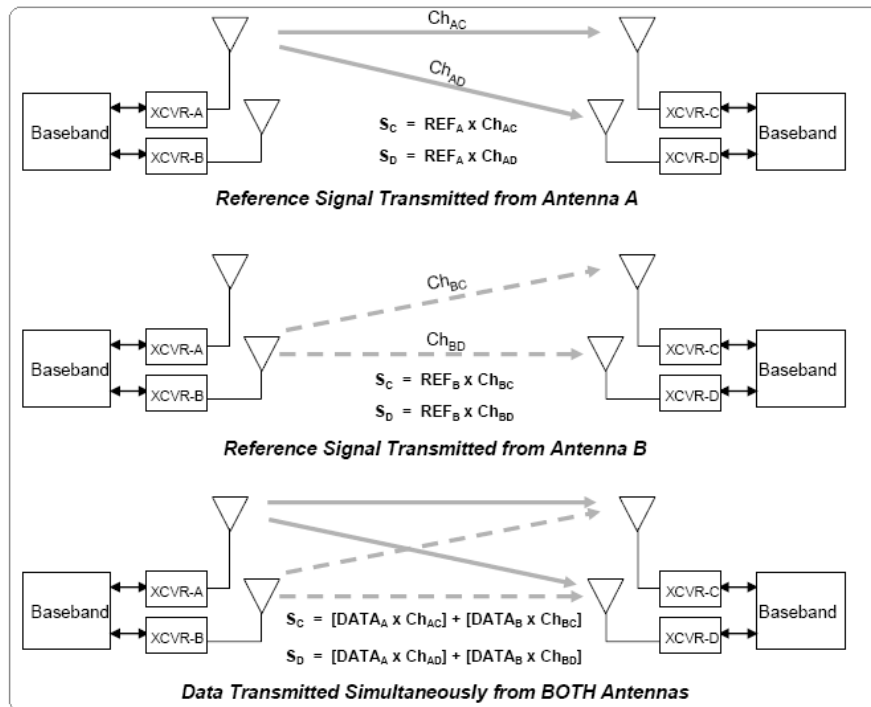
Figur 4.4-15a viser en konvensjonell enkelt kanalmottaker med antenne diversitet. Denne mottakerstrukturen bruker flere antenner, men den er ikke i stand til å støtte MRC/MIMO. Den grunnleggende topologien for mottakerstruktur for både MRC og MIMO er vist på figur 4.4-15b. MRC og MIMO er noen ganger referert til som "flere antenner" teknologier, men dette er litt av en misvisende benevnelse. Merk at hovedforskjellen mellom mottakere vist på begge figurene ikke er flere antenner, men heller flere sender-mottakere (eng. Transceiver). Med MRC er et signal mottatte via to (eller flere) separate antenner per mottaker par. Vær også oppmerksom på at antennene står fysisk godt atskilt, og derfor har begge forskjell opplevelse i kanalens impulsrespons. Kanal kompensasjon brukes på hvert mottatte signal innenfor basisbånd prosessoren før de kan lineært kombineres for å lage et unikt mottatt signal. Når de kombineres på denne måten, er mottatte delsignaler koherentlig summert innenfor den basisbånds prosessoren (se figuren nedenfor).



Figur 4.4-16: MRC i en AWGN og frekvens selektiv fading kanal [13].

Bortsett fra å forbedre SNR, er MRC mottaker robust i nærvær av frekvens selektiv fading. Ved dette fenomenet er disse godt atskilte antennene statistisk usannsynlige at en gitt delbærer vil gjennomgå dyp fading på begge mottakers kanaler. Muligheten for dype frekvens-selektive toner i det sammensatte signalet er derfor detydelig redusert. MRC forbedrer link pålitelighet, men den øker ikke nominale systemets datarate. I MRC-modus blir data overført av en enkelt antenne og er behandlet på mottakeren via to eller flere mottakere. Dette er derfor en form for mottaker diversitet.

MIMO derimot øker systemets datarater ved å benytte flere antenner både på senders og mottakers ender. Dette forbedrer link pålitelighet ved å kombinere alle komponentene involvert på en intelligent måte, se figuren nedenfor.



Figur 4.4-17: MIMO og kanalrespons.

Operasjonen krever førkunnskaper av alle kanalresponsen [13].

For å kunne motta et overført MIMO-signal, må mottakeren bestemme kanalens impulsrespons fra hver enkelt sendingsantenne. I LTE blir kanalstatus bestemt av sekvensielle overføring kjent som referansesignaler fra hver senderantenne. For eksempel, det er 4 kanal impulsresponsen (C1, C2, C3, og C4) i et 2x2 MIMO system, slik som vist på figur 4.4.5..5-3. Merk at mens en sender antenne overfører et gitt referanse signal, er den andre antenne ubesatt (eng. Idle). Når kanalens impulsresponsen er gjenvunnet, kan data overføres fra begge antenner samtidig. Den lineære kombinasjonen av de to datastrømmene på mottaker antennene resulterer i et sett med to ligninger og to ukjente, som er løsbare i de to opprinnelige datastrømmene. MIMO implementeres i to hovedteknikker: SU-MIMO (Single User-MIMO) som dette eksemplet gitt over; og MU-MIMO (Multi User- MIMO) som er begrenset av interferens mellom parallelle MIMO brukere som f.eks. befinner seg i et multicelle dekningsområde. MU-MIMO systemer krever en viss kooperasjon mellom isolerte SU-MIMO brukere for å minske interferensen.

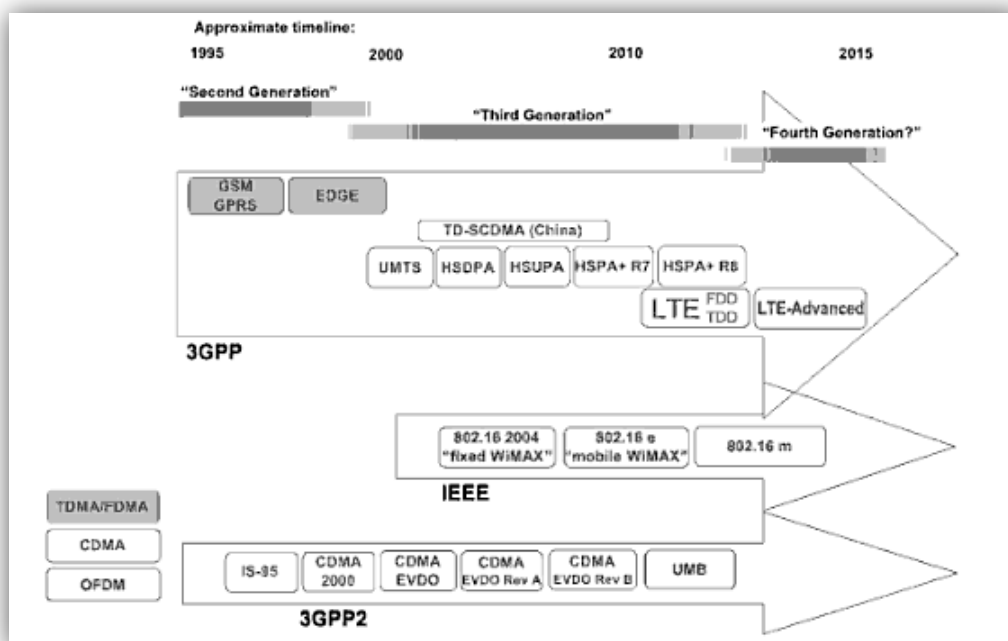
4.5. LTE versus Mobile WiMAX (sammenligning)

4.5.1. Introduksjon

I motsetning til overføringsmedium av kobberlinjer og optisk fiber baserte teknologier er radiofrekvensområdet et medium delt mellom ulike teknologier som potensielt kan være interferens kilder.

ITU-R definerer teknologi-familier og assosierer bestemte deler av spekteret med disse familiene. En av rollene til ITU-R er å identifisere spektrum for radiomobile teknologier som oppfyller kravene til ITU-R, disse teknologiene blir kalt IMT-familien. Familien består av systemer som kalles "Tredje Generasjon" og utover.

Fra et teknologi og standard synspunkt, er det i dag tre organisasjoner som er ansvarlige for utviklingen av standarder som imøtekommer IMT-kravene (se delkapitler 2.2, 4.3.1, og 4.4.3), og som fortsetter å forme landskapet av mobile radiosystemer (figur 4.5-1).



Figur 4.5-1: Utvikling av mobile kommunikasjonsstandarder, 3GPP-LTE, IEEE-802.16m og 3GPP2-UMB [18].

I den første utviklingslinjen vist i figur 4.5-1 finner vi 3GPP. Denne utviklingslinjen bruker tydelig tre multipl aksess-teknologier: andre generasjons GSM/GPRS/EDGE-familien er basert på TDMA og FDMA; tredje generasjons UMTS-familien er basert på CDMA mest kjent som Wideband-CDMA; og til slutt har LTE innført OFDM, som er den dominerende teknologien i de siste standardene for den mobile videreutviklingen. LTE er i stand til å dra nytte av kunnskaper og videreutvikling av HSPA og HSPA+. Den optimaliserer protokollstakken og er samtidig fri til å radikalt innføre ny teknologi uten begrensninger på grunn av inkompatibilitet i forhold til nåværende systemer. I 2008 var 3GPP allerede ute med LTE Rel.8, og kravene i tabell 4.4-2 er hentet fra denne utgaven. De siste LTE utviklingene er rettet mot LTE-Advanced.

I den andre utviklingslinjen i figur 4.5-1 ser vi en gruppeteknologier som kalles 802.16-familien. Disse er en undergruppe av IEEE 802 LAN/MAN og har som formål å utvikle en standard for bredbånd trådløssaksess. Denne familien er også fullt pakkeorientert. Detaljene rundt Mobile WiMAX er avgitt gjennom delkapitler 4.2 og 4.3 over.

Den tredje utviklingslinjen vist i figur 4.5-1 er ledet av et partnerskap mellom flere organisasjoner som ligner 3GPP, partnerskapet kalles 3GPP2. Denne utviklingslinjen baserer seg på den Amerikanske IS-95 standarden som var den første mobilnett kommunikasjonssystemet til å bruke CDMA-teknologi. Videre ble CDMA2000 utviklet og iverksatt hovedsakelig i USA, Korea og Japan. Slik som 3GPP er den siste utviklingen i 3GPP2 basert på et OFDM-system. Denne utviklingen kalles UMB (Ultra-Mobile-Broadband), avledet delvis fra et proprietært system kjent som "Flash-OFDM^A".

Den generelle trenden av utviklingslinjene viser at de mobile radioteknologiene går mot en fleksibel og pakkeorienterte multitjeneste systemer. Målet for alle disse systemene er å tilby et mobilt bredbånd brukeropplevelse som kan nærme seg dagens faste aksessnettverk som ADSL og Fiberbaserte nettverk. I dette delkapittelet er to av disse IMT-teknologiene sammenlignet, nemlig Mobile WiMAX og LTE. Tekniske egenskaper mellom 3GPP LTE Rel.8 og systemprofilen for Mobile WiMAX (delkapittel 4.2) vil bli sammenlignet med stor vekt på radio grensesnitts aspektet og noen MAC aspekter. Markedstrender vil også refereres litt om.

I sammenligningen legger jeg til grunn følgende:

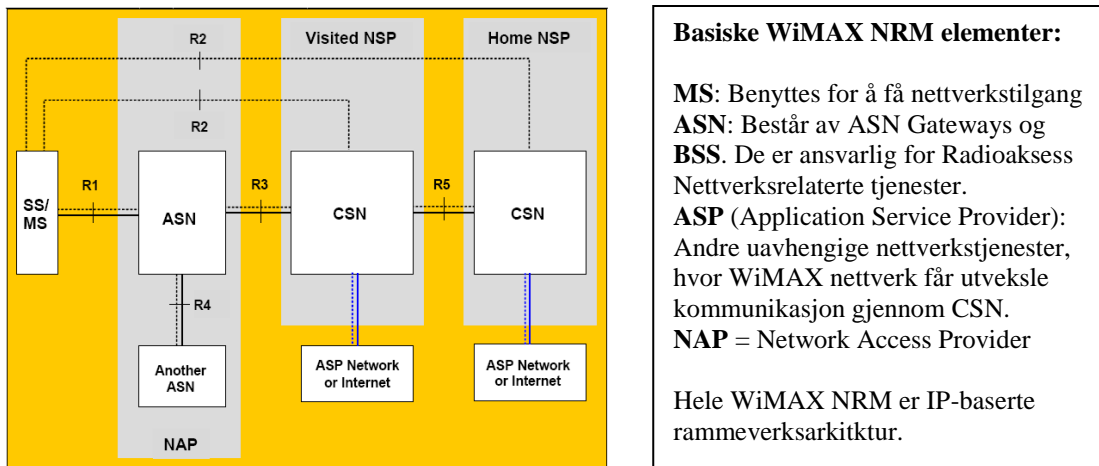
	LTE	Mobile WiMAX
Standard	3GPP LTE Release 8 (2008)	IEEE 802.16e-2005
Referanse/ Simulasjon	-	WiMAX Mobile systemprofil Rel.1.5 (TDD/FDD)** (profilen dekker 5, 7, 8.75, og 10 MHz kanalbandbredder)

Tabell 4.5-1: Referanser som legges til grunn for sammenligning. Merk at kun Mobile WiMAX blir simulert, og den vil benytte systemprofilen basert på IEEE 802.16e-2005.

** WiMAX Mobile systemprofil 1.0 dekker kun frekvensbånd for TDD-modus.

4.5.1.1. WiMAX arkitektur

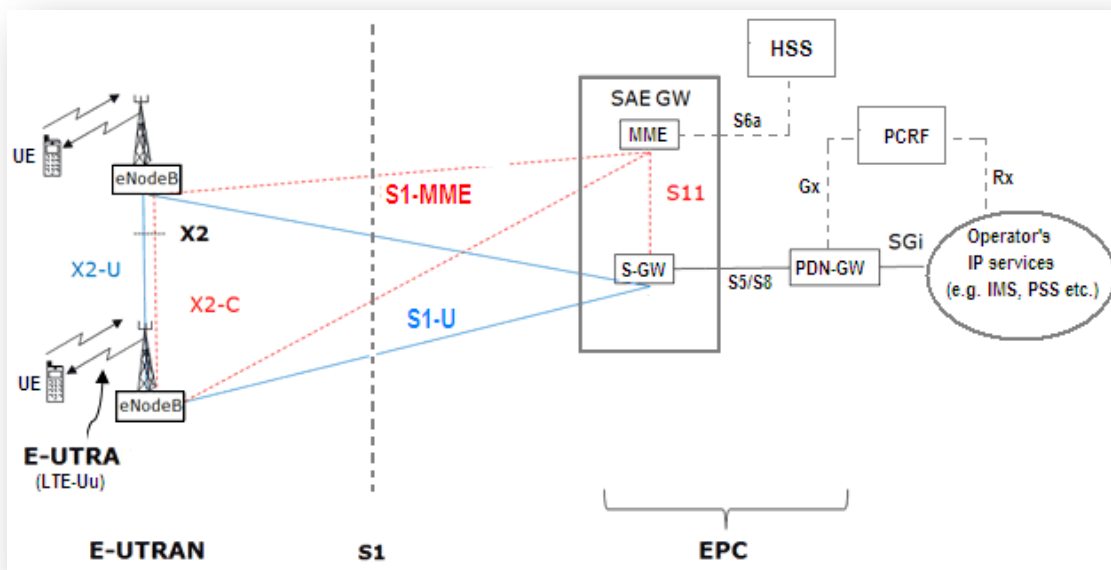
NRM (Network Reference Model) for WiMAX ble utviklet av arbeidsgruppen til WiMAX (Network Working Group). Modellen definerer hele WiMAX-nettverket, og dette er laget på bakgrunn av en sikker interoperabilitet mellom ulike WiMAX enheter og operatører.



Figur 4.5-1a: WiMAX Nettverks Referanse Modell [23]. Modellen er delt i tre: Mobilstasjon (MS/SS), Aksessnettverks tjenester (ASN) og Forbindelsesnettverks tjenester (CSN).

4.5.1.2. LTE arkitektur

Den generelle LTE-arkitekturen består i hovedsak av EPS (Evolved Packet System). Videre er EPS formet av EPC (kjerne nettverk), E-UTRAN (radioaksess nettverk) og E-UTRA (radiogrensesnitts nettverk).



Figur 4.5-1b: EPS arkitekturen [18].

EPC er kjernenettverket i SAE (System Architecture Evolution). EPC er fullstendig IP-baserte nettverk, og er ansvarlig for levering av tjenester til brukerstyr som befinner seg oppkoblet mot aksessnettverk. Eksempel på tjenester er: samtaledebitering, UE autentisering, anropsstyring med mer (se figur over).

E-UTRAN er radioaksess nettverket, den er ansvarlig for radiolinjestyring, lenke tilpasning, fysiske lag, scheduling, koding, radioressurs håndtering, forbindelse til EPC og mer.

E-UTRA er radiogrensesnittsnettverket. Dette i likhet med R1 for WiMAX er temaet i denne avhandlingen. Hele avsnitt 4.5.2 handler om dette.

4.5.2. Radiogrensesnitt

4.5.2.1. Frekvens spektrum og radioaksess modus

Mobile WiMAX (802.16m) skal operere i det samme frekvensspektrumet identifisert for IMT-A. Dette er avgitt i delkapittel 2.4, ved tabell 2.4-1. For (802.16e-2005 OFDMA PHY)-baserte systemprofiler er følgende frekvensbånd benyttet:

TDD Systemer		FDD Systemer	
Klasse	Frekvens [MHz]	Klasse	Frekvens [MHz]
T1	2300 – 2400	F1	2300 – 2400
T2	2305 – 2320, 2345 – 2360	F2	2305 – 2320, 2345 – 2360
T3	2496 – 2690	F3	2496 – 2690
T4	3300 – 3400	F4	3300 – 3400
T5	3400 – 3800	F5	3400 – 3800
T6	698 – 862	F6	690 – 862
		F7	1710 – 1755, 2110 – 2155

Tabell 4.5-2: Frekvens spektrum for WiMAX. Klasser skal velges i samsvar med deployeringsscenarier, land eller region [21]. Alle bånd kan anvendes for både BS og MS.

I motsetning har LTE en rekke frekvensbånd som kan operere i både FDD og TDD. Se fullstendig tabell nedenfor:

E-UTRA Operating Band	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit	Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive	Duplex Mode
	F _{UL low} – F _{UL high}	F _{DL low} – F _{DL high}	
1	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	FDD
3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	FDD
4	1710 MHz – 1755 MHz	2110 MHz – 2155 MHz	FDD
5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894 MHz	FDD
6	830 MHz – 840 MHz	875 MHz – 885 MHz	FDD
7	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz	FDD
8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	FDD
9	1749.9 MHz – 1784.9 MHz	1844.9 MHz – 1879.9 MHz	FDD
10	1710 MHz – 1770 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
11	1427.9 MHz – 1452.9 MHz	1475.9 MHz – 1500.9 MHz	FDD
12	698 MHz – 716 MHz	728 MHz – 746 MHz	FDD
13	777 MHz – 787 MHz	746 MHz – 756 MHz	FDD
14	788 MHz – 798 MHz	758 MHz – 768 MHz	FDD
...			
17	704 MHz – 716 MHz	734 MHz – 746 MHz	FDD
...			
33	1900 MHz – 1920 MHz	1900 MHz – 1920 MHz	TDD
34	2010 MHz – 2025 MHz	2010 MHz – 2025 MHz	TDD
35	1850 MHz – 1910 MHz	1850 MHz – 1910 MHz	TDD
36	1930 MHz – 1990 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	TDD
37	1910 MHz – 1930 MHz	1910 MHz – 1930 MHz	TDD
38	2570 MHz – 2620 MHz	2570 MHz – 2620 MHz	TDD
39	1880 MHz – 1920 MHz	1880 MHz – 1920 MHz	TDD
40	2300 MHz – 2400 MHz	2300 MHz – 2400 MHz	TDD

Tabell 4.5-3: Frekvens spektrum for LTE E-UTRA ([22], table 5.5-1).

TDD versus FDD:

TDD gir en mer fleksibel deling av båndbredden mellom opplink og nedlink, krever ikke parret spektrum, har en gjensidig kanal som kan utnyttes for romlig behandling (eng. Spatial processing) eller link tilpasning ved hjelp av kanalensstatus målinger [9], og har en enklere sender-mottaker design. Ulempen med TDD er behov for synkronisering på tvers av flere basestasjoner (BS) for å sikre interferens-fri sameksistens.

I simulasjonene som er gjort ble det brukt en bærefrekvens på 2500 MHz. Bærefrekvensen for LTE opererer i FDD-modus, mens for WiMAX opererer det samme båndet i TDD-modusen.

4.5.2.2. Fysiske lag oversikt

Nedenfor er fysiske lag for WiMAX og LTE oppsummert. Tabellen etterfølges av noen kommentarer.

	Mobile WiMAX	3GPP LTE (E-UTRA)
Nedlink Aksess	OFDMA	OFDMA
Opplink Aksess	OFDMA	SC-FDMA
Dupleksing	TDD / FDD	FDD / TDD
Delbærebølger avbildning	Lokalisert og Distribuert	Lokalisert og Distribuert
Delbærebølger hopping	Ja	Ja
Kanal koding	CC, CTC, BTC, LDPC	CC, CTC
Data modulasjon	QPSK, 16QAM , (64QAM -valgfritt for UL)	QPSK, 16QAM , 64QAM
Antenne teknikk (MIMO)	DL : (2tx x 2rx) UL : (1tx x 2rx)	DL : (2tx x 2rx) , (4tx x 2rx) UL : (1tx x 2rx) , (2tx x 2rx)
Topp Datarate, (DL/UL) Mbps (Innen 20 MHz)	75 / 25	100 / 50 [26]
Bruker-latenstid [ms]	< 20 ms	< 10 (UE – eNodeB)
Kontroll-latenstid	< 60 ms (RTD: IP CS – IP over Ethernet CS)	< 100 ms
Antall bruker / Celle	100 - 200	200 (for hver 5 MHz) 400 (for større BW) [26]
Rekkevidde [Km]	2 – 7	5 [26]
Mobilitet (Høy ytelse ved Kmph)	0 – 15 (optimalt) 15 – 120 (høy ytelse)	0 -15 (Optimalt) 15 – 350 (høy ytelse) [26]
Spektral Effektivitet [bps/Hz], (DL / UL) for 20 MHz	1.5 / 0.75 (Se MIMO oppsetting over)	5 / 2.5 [26]
Nettverk Arkitektur	IP-basert	IP-basert
Forventet	2009	2010

Tabell 4.5-4: Systemer og teknologier oppsummering.

4.5.2.2.1. Kommentarer over parametere i tabell 4.5-4

4.5.2.2.1.1. Nedlink aksessteknologi

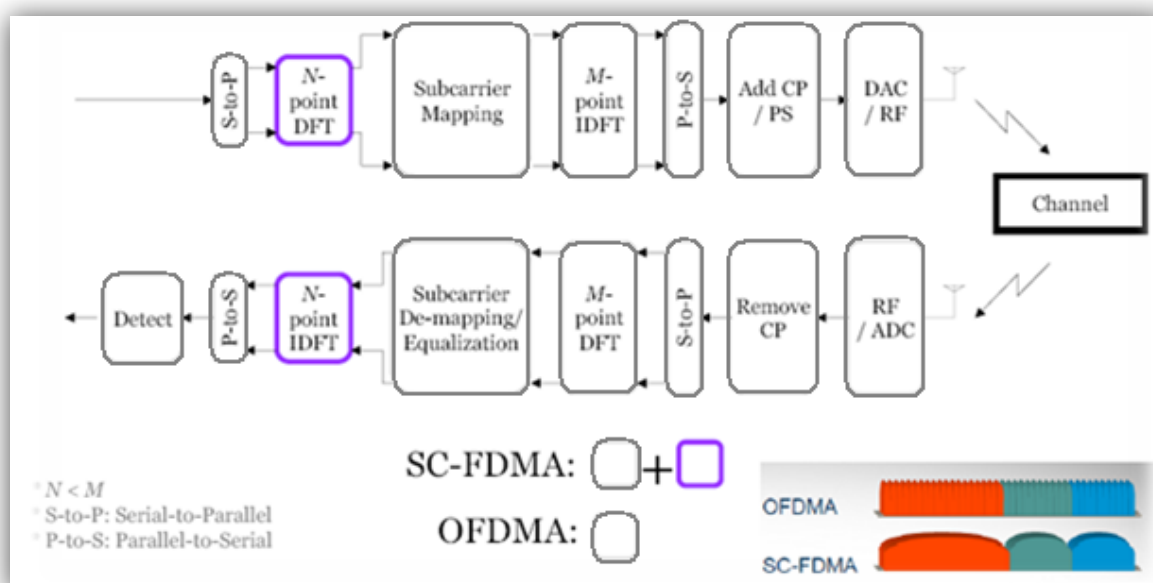
Mobile WiMAX og LTE benytter begge OFDMA som aksessmetode for nedlink. OFDMA er en OFDM utvidelse for å implementere flerbruker kommunikasjonssystem. I OFDM er det bare en enkelbruker som benytter seg av alle delbærere for å sende eller motta data i et bestemt tidspunkt (f.eks. 256 FFT WiMAX fastnett benytter OFDM).

I OFDMA er delbærere fordelt til ulike brukere samtidig, slik at flere brukere kan organiseres på en dynamisk måte til å motta eller sende data samtidig. Data symboler benytter direkte modulasjonsskjema for å modulere hver enkelt delbærer, (slik at amplituden for hver delbærer i et tidspunkt er gitt av konstellasjonspunkter i det benyttede digitale modulasjonsskjemaet).

4.5.2.2.1.2. Opplink aksessteknologier

Mobile WiMAX benytter OFDMA mens LTE bruker SC-FDMA som aksessmetode for opplink. Til tross for alle fordeler av OFDM-baserte nedlink medbringer denne teknologien desverre noen ulemper: følsomhet for dopplerskift, synkroniseringsproblemer og ineffektive strømforbruk på grunn av høy PAPR (Peak-to-Average Power Ratio).

SC-FDMA er en multiplert aksessteknikk basert på SC-FDM (Single Carrier – Frequency Division Multiplexing). OFDM- og SC-FDM teknologier er i hovedsak designet for de samme formålene. Disse teknologiene muliggjør for eksempel båndbreddens fleksibilitet i henhold til et tilgjengelige spekter og en reduserte mottakerskompleksitet (ved utjevning). Strukturen i figur 4.5-2 viser to spesielle funksjonsblokker i tillegg til den OFDM-baserte funksjonsstrukturen. Disse funksjonsblokkene DFT (på senders side) og IDFT (på mottakers side) er ansvarlige for å utføre den nødvendige SC-FDM-operasjonen.



Figur 4.5-2: OFDMA/SC-FDMA sender-mottaker strukturer [24].

Legg merk på DFT blokker for SC-FDMA system.

4.5.2.2.1.3. Fysiske lag Datarater

WiMAX og LTE fysiske lag er ganske fleksible, og datarateytelse varierer i henhold til parametere et system opererer med. Parametere som har en betydelig innvirkning på dataraten for det fysiske laget er: kanalbåndbredde, adaptiv modulasjon og koding (AMC) benyttet. Antall delkanaler, OFDM sikkerhetstid (eng. Guard time) og oversampling rate har også innvirkning. Topp dataraten øker ytterligere i rike multipath kanaler ved rom multipleksing som bygges av flere antenner på senders side og/eller mottakers side.

1) Mobile WiMAX datarate

WiMAX støtter QPSK, 16-QAM og 64-QAM. Disse tre er obligatoriske parameterne i nedlink Mobile WiMAX, mens 64-QAM i UL-retningen er valgfritt. CC (Convolutional Coding) og CTC (Convolutional Turbo Coding) med variabel kode rater og repetisjonskoding er også benyttet. Mens BTC og LDPC (Low Density Parity Check Code) er valgfrie funksjoner. Tabellen nedenfor oppsummerer PHY data rater for to av Mobile WiMAX sertifiseringer (5 og 10 MHz) kanaler med PUSC kanaldeling. Det er illustrert over at hver 5 ms ramme har 47 OFDM symboler, med 44 OFDM symboler for dataoverføring og 4 symboler for andre funksjoner (dette tilsvarer ca 9.5% av tilgjengelige symbol området).

Parameter	DL	UL	DL	UL	
System Båndbredde	5 MHz		10 MHz		
FFT-punkprøver	512		1024		
Null bærere	92	104	184	184	
Pilot bærere	60	136	120	280	
Data bærere	360	272	720	560	
Delkanaler	15	17	30	35	
Symbol Periode, T_s	102.857 mikrosekunder				
Ramme lengde	5 milisekunder				
OFDM Symboler/Ramme	47				
Data OFDM Symboler	44				
Mod.	Kode Rate	DL Rate, Mbps	UL Rate, Mbps	DL Rate, Mbps	UL Rate, Mbps
QPSK	½ CTC, 6x	0.53	0.38	1.06	0.78
	½ CTC, 4x	0.79	0.57	1.58	1.18
	½ CTC, 2x	1.58	1.14	3.17	2.35
	½ CTC, 1x	3.17	2.28	6.34	4.70
	¾ CTC	4.75	3.43	9.50	7.06
16QAM	½ CTC	6.34	4.57	12.07	9.41
	¾ CTC	9.50	6.85	19.01	14.11
64QAM	½ CTC	9.50	6.85	19.01	14.11
	2/3 CTC	12.67	9.14	26.34	18.82
	¾ CTC	14.26	10.28	28.51	21.17
	5/6 CTC	15.84	11.42	31.68	23.52

Tabell 4.5-5: Mobile WiMAX PHY Data Rater med PUSC kanaldeling.

PHY Data Rate = (Data bærere/Symbol periode)*(informasjons biter per symbol) – 9.5% (antatt % av overheader) [23]. Antall informasjonsbiter per symbol avhenger av modulasjonsmetode og koding: ($M \cdot \text{Kode rate}$). M er antall biter per modulere symbol. Med repetisjon blir PHY Data Rate ($1x$) delt igjen i antall repetisjonskode.

Data raten vil selvfølgelig øke når følgende avanserte antennteknikker benyttes. Opplink for 802-16e-2005 PHY lag støtter bare en senderantenne og maksimal 2 mottakers antenner.

Link	Beam forming	Space Time Coding	Spatial Multiplexing
DL	$N_t \geq 2, N_r \geq 1^3$	$N_t = 2, N_r \geq 1$ Matrix A	$N_t = 2, N_r \geq 2$ Matrix B, vertical encoding
UL	$N_t \geq 1, N_r \geq 2$	N/A	$N_t = 1, N_r \geq 2$ Two-user collaborative SM

³ N_t : number of transmit antenna; N_r : number of receive antenna

Tabell 4.5-6: Nedlink (DL) og opplink (UL) arkitektur for avanserte antennteknikker [9]. Mobile WiMAX støtter adaptiv svitsjing mellom disse alternativene. Dette for å nytte godt av smart antennteknologier under ulike kanalforhold.

Ved å kombinere fysiske datarater og antenne arkitektur over, kan 2x2 MIMO for Nedlink brukerdataber og per sektor topp datarater dobles. Den maksimale DL topp dataraten blir 63.36 Mbps når alle 44 data symboler er dedikert for DL (dette er sjelden brukt). På den andre siden er opplink sektor topp datarater også doblet, mens bruker topp dataraten er uforandret. Opplink implementerer samarbeids romdiversitet (eng. UL collaborative Spatial Multiplexing). Opplink per bruker og per Sektor topp dataratene er 14.11 Mbps og 28.22 Mbps henholdsvis når alle 44 data symboler er dedikert for opplink (se tabell 4.5-5/6). Ved å bruke ulike DL/UL forhold, kan båndbredde mellom DL og UL justeres for å imøtekomme ulike trafikkmønster. Mobile WiMAX profil støtter DL/UL forhold fra 1:1 til 3:1 for ulike trafikkprofiler, se tabellen nedenfor.

DL/UL Ratio		1:0	3:1	2:1	3:2	1:1	0:1	
User Peak Rate (Mbps)	SIMO (1x2)	DL	31.68	23.04	20.16	18.72	15.84	0
		UL	0	4.03	5.04	6.05	7.06	14.11
	MIMO (2x2)	DL	63.36	46.08	40.32	37.44	31.68	0
		UL	0	4.03	5.04	6.05	7.06	14.11
Sector Peak Rate (Mbps)	SIMO (1x2)	DL	31.68	23.04	20.16	18.72	15.84	0
		UL	0	4.03	5.04	6.05	7.06	14.11
	MIMO (2x2)	DL	63.36	46.08	40.32	37.44	31.68	0
		UL	0	8.06	10.08	12.10	14.12	28.22

Tabell 4.5-7 : Datarater for SIMO/MIMO konfigurasjoner ved TDD modus [9]. De gulfargete kolonnene viser topp datarater for de 2 tilfellene [9]. Husk at opplink i denne systemprofilen støtter bare til og med 16-QAM som obligatorisk modulasjonsskjema.

Innholdet i tabellen er beregnet slik: For eksempel i DL/UL forholdet (3:1), for DL raten finner vi PHY dataraten på vanlig måte som i tabell 4.5-5 og i tillegg multipliserer verdien

på forholdsfaktor (3/4), dette fordi UL tar en fjerde del. Og for UL er selvfølgelig å gange PHY dataratene med (1/4). Hvis MIMO 2x2 er benyttet så ganger vi resultatene igjen med 2, {demo: $(720/(102.9 \text{ us}) * 5 \text{ info biter} * \frac{3}{4}) - 9.5\%$ av PHY dataratene = 23.04 Mbps}.

Basestasjons kanalforvalter (eng. Scheduler) bestemmer den aktuelle dataratene (eller burst profil) for hver burst allokering basert på blant annet buffer størrelse, kanal tilstand eller utbredelsesforhold på mottakeren osv. En CQI (channel Quality Indicator) kanal er benyttet for å levere kanalstatus informasjon fra brukere terminaler til basestasjons kanalforvalter. Relevante kanalstatus informasjonen som f.eks., fysisk CINR, effektiv CINR, valg av MIMO modus, og valg av frekvens selektiv delkanal, kan mates tilbake ved å benytte CQICH.

2) LTE PHY datarate

PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) er den viktigste data-bærende DL kanalen i LTE. Den brukes for alle brukerdata, samt for kringkasting system informasjon som ikke er overført på PBCH (Physical Broadcast Channel), og for personsøk (paging) meldinger – det finnes ingen spesifikk fysisk lag paging kanal i LTE systemet. Data overføres på PDSCH i enheter som kalles transport blokker, som hver tilsvarer en MAC-PDU (Protocol Data Unit). Transport blokker kan bæres ned fra MAC-laget til det fysiske laget en gang per overføring tidsintervall (TTI – Transmission Time Interval), hvor en TTI er 1 ms lang, tilsvarende varighet for en delramme. Når en PDSCH kanal benyttes for brukerdata, én eller i beste fall to transport blokker kan overføres per UE (User Equipment) per delramme. Dette avhenger av transmisjonsmetoden valgt for PDSCH for hver UE. De 7 mulige transmisjonsmetodene en PDSCH kan konfigurere multi-antenne teknikk: Transmisjon opprinnelig fra en enkelt eNodeB antenneport, senderdiversitet, åpen sløyfe- og lukket sløyfe spatial multipleksing, MIMO, lukket sløyfe rank, og transmisjon ved bruk av UE-spesifikk referanse signaler.

Etter kanal koding og avbildning til spatial lag i samsvar med den valgte sendingsmodusen, er kodede databiter avbildet videre til moduleringssymboler avhengig av modulasjonsskjema (QPSK, 16QAM, og 64QAM) som blir utvalgt etter radiokanal forhold og krav til datarate. Ressurser som brukes for PDSCH overføring kan være de som ikke er reservert for andre formål (f.eks. synkroniseringssignal, referanse signal, PBCH, og styringssignaler). Data avbildningen til fysiske ressursblokker kan realiseres ved lokalisert eller distribuert avbildning. Generelt sett er antall biter som kreves for ressursallokering avhenger av systems båndbredde (se tabell 4.5-9), og derfor vil data mengde variere med BW i systemet. I LTE er MCS (Modulation and Coding Scheme) konstant over allokeret frekvens ressurser for en gitt bruker, og i stedet LTE støtter tidsdomene scheduling som avhenger av kanalen og AMC (Adaptive Modulation and Coding), ([18], s.209). Tabellen nedenfor viser kode rater og informasjonsbiter per symbol for hvert modulasjonsskjema.

CQI index	modulation	Code Rate	code rate x 1024	efficiency
0			out of range	
1	QPSK	0.076	78	0.1523
2	QPSK	0.12	120	0.2344
3	QPSK	0.19	193	0.3770
4	QPSK	0.3	308	0.6016
5	QPSK	0.44	449	0.8770
6	QPSK	0.59	602	1.1758
7	16QAM	0.37	378	1.4766
8	16QAM	0.48	490	1.9141
9	16QAM	0.6	616	2.4063
10	64QAM	0.45	466	2.7305
11	64QAM	0.55	567	3.3223
12	64QAM	0.65	666	3.9023
13	64QAM	0.75	772	4.5234
14	64QAM	0.85	873	5.1152
15	64QAM	0.93	948	5.5547

Tabell 4.5-8: LTE CQI tabell [29]. Kode rater i kolonne 3 er beregnet ut fra faktor på den fjerde kolonnen. Mens ”efficiency” tilsvarer informasjonsbiter per symbol.

4.5.2.2.1.4. Kanaldeling eller Delbærere avbildning

I Mobile WiMAX er spesifikke ekstrainformasjon for teknologien (eng. overhead information) større enn i LTE, og WiMAX utnytter disse ekstra bitene for å implementere *distribuerte* kanaldeling hvilket krever stor mengde av styringsinformasjon. I motsetning til LTE som utnytter *lokalisert* kanaldelingsmetode (se figur 4.3-4 på delkapittel 4.3.2.8 over).

WiMAX i PUSC-modus er basert på delkanaler. Én delkanal tar opp 2 PUSC clusters som tilsvarer totalt i 28 delbærere \times 2 OFDM symboler for UL (3 OFDM symboler for DL), (tabell 4.2-6 og delkapittel 4.2.7.4.4). I 20 MHz båndbredde for eksempel er 60 delkanaler tilgjengelige, og dette gir (2 PUSC clusters \times 60 delkanaler) + 1 pilot = 1681 delbærere med en total av 3362 OFDM symboler for UL (5043 DL OFDM symboler). Dette tilsvarer 72 (107) rammer når en 5 ms rammelengde er brukt. Delkanalene er fortrinnsvis tilordnet delbærere via en permutasjon funksjon. Et av formål for denne funksjonen er å tilpasse kanalens gjennomsnittlige interferensnivå med delbærere (allokerer mere eller mindre data avhengig av kanal interferensnivå). *Distribuerte delbærere som er spesielt nyttig for mobile WiMAX applikasjoner benytter ikke kanalenskjennskap og kan implementere frekvenshopping. Den har fordeler for diversitet i frekvens ved sending av hver transport blokk*, [4]. Innenfor en ramme, kan delkanaler fleksibelt allokeres til brukere i to dimensjoner tid- og frekvensdomene slik at en rektangulær bruker er formet.

LTE partisjonerer 1 ms delramme i 12×7 striper som kalles PRBs (Physical Resource Blocks). Antall PRB-ene beregnes ved formel (1) på delkapittel 4.4.4.2.3, avhengig av båndbredde. Det er 100 PRB-er for 20 MHz BW (se tabell 4.4-9 for detaljer). Legg merke til at PRB-verdiene i tabellen er i henhold når 1-enhet trekkes fra resultater funnet i formelen, dvs. ($PRB_{RB}^{DL} - 1$) slik som definert på [16], §6.2.3. Avbildningen av LTE PRB-er til fysiske delbærere er enten lokalisert eller distribuert med den første som foretrukket måten for å gi *mer effektive frekvens selektive pakkefordeling, men dette resulterer til lavere mobilitet* [4] (dvs. eNodeB evaluerer tilgjengelige kanalinformasjonen til å planlegge en bestemt UE for å sende ved å bruke spesifikke Ressurse Blokker i frekvensdomenet der kanalresponsen er god), men frekvens diversitet kan fortsatt implementeres ved hjelp av frekvens hopping nær randsoner mellom to tidsluker eller mellom to delrammer. Det er ingen frekvens hopping innenfor en tidsluke. For lokaliserte delbærere permutasjonen, er en tidsluke tilsvarende én gitter av $N_{RB}^{UL} N_{sc}^{RB}$ delbærere og N_{symb}^{UL} symboler for opplink, og $N_{RB}^{DL} N_{sc}^{RB}$ delbærere og N_{symb}^{DL} for nedlink. Dvs.: I 20 MHz båndbredde f.eks. er (100 PRBs \times 12 delbærere) = 1200 delbærere som gir igjen en total av 8400 eller 7200 OFDM / SC-FDMA symboler hhv for 7 eller 6 symboler per delbærere i tidsluka (se tabell 4.4-9 og Tabell 4.5-9). Dette gir mye høyere dataraten enn i mobile WiMAX tilfellet, les gjerne videre for illustrasjon.

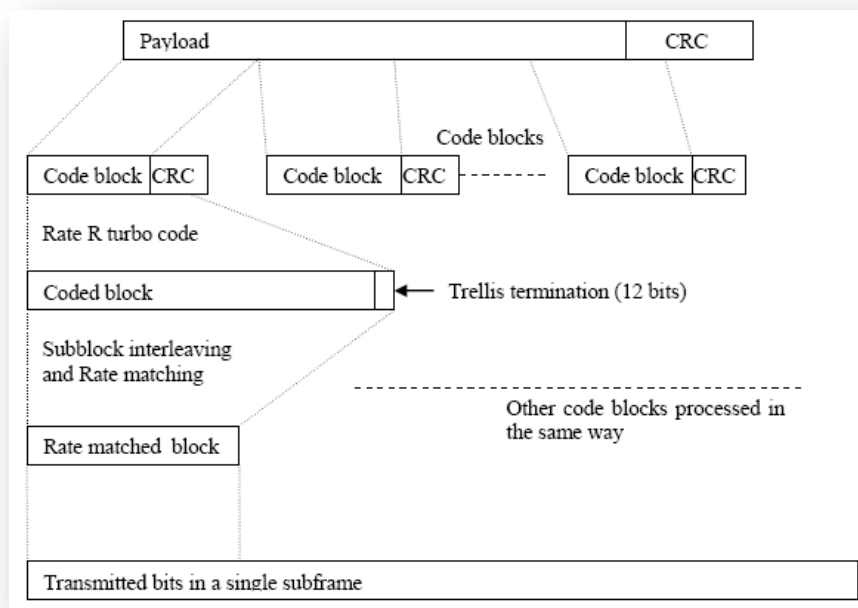
Reference channel	A5-1	A5-2	A5-3	A5-4	A5-5	A5-6	A5-7
Allocated resource blocks	1	6	15	25	50	75	100
DFT-OFDM Symbols per subframe	12	12	12	12	12	12	12
Modulation	64QAM	64QAM	64QAM	64QAM	64QAM	64QAM	64QAM
Code rate	5/6	5/6	5/6	5/6	5/6	5/6	5/6
Payload size (bits)	712	4392	11064	18336	36696	55056	75376
Transport block CRC (bits)	24	24	24	24	24	24	24
Code block CRC size (bits)	0	0	24	24	24	24	24
Number of code blocks - C	1	1	2	3	6	9	13
Coded block size including 12bits trellis termination (bits)	2220	13260	16716	18444	18444	18444	17484
Total number of bits per sub-frame	864	5184	12960	21600	43200	64800	86400
Total symbols per sub-frame	144	864	2160	3600	7200	10800	14400

Tabell 4.5-9: LTE datarater for nedlink ytelseskrav ved 64-QAM 5/6 modulasjon [22].

I tabellen har vi: **Total symbols per subframe** = (DFT-OFDM symb.per subframe) × (Allocated RBs) × (12 subcarriers). **Total No.of bits per subframe** = (Total symb.per subframe) × (M bits per symbol). Krav for maksimal **Payload size** er gitt av [29] på side 28.

Etter normen i [22] er maksimal gjennomstrømning gitt ved produkt av Nyttelast størrelse (eng. Payload) og antall opplink/nedlink delrammer per sekund. FDD systemer for eksempel benytter 1000 opplink delrammer i én sekundstid (1 ms x 1000) [22]. Dette vil gi for en nedlinkkanal med 20 MHz BW og MCS 64QAM 5/6 en **maksimal Datarate på 75.376 Mbps**.

Figur 4.5-3 illustrerer den totale bitmengden per delramme som er avgitt i tabell 4.5-9. Det er lettere å danne et bilde over en strukturert delramme.



Figur 4.5-3: LTE' skjematisk oversikt for nedlink kodingsprosess [22].

Dataratens Minimumskrav for opplinkkanal med 20 MHz/64QAM er ca 70% av maksimal UL dataraten. Tilnæringsberegning gjøres på samme måte som DL: dette gir **52.76 Mbps**, [30]. Tabellen nedenfor viser UL dataraten for alle LTE båndbreddene. UL dataraten kan også variere etter UE-kategori.

Parameter	Unit	Value					
		[R.5 FDD]	[R.6 FDD]	[R.7 FDD]	[R.8 FDD]	[R.9 FDD]	
Reference channel							
Channel bandwidth	MHz	1.4	3	5	10	15	20
Allocated resource blocks			15	25	50	75	100
Allocated subframes per Radio Frame			10	10	10	10	10
Modulation		64QAM	64QAM	64QAM	64QAM	64QAM	64QAM
Target Coding Rate		3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4
Information Bit Payload							
For Sub-Frames 1,2,3,4,6,7,8,9	Bits		8504	14112	30576	46888	61664
For Sub-Frame 5	Bits		n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
For Sub-Frame 0	Bits		6456	12576	28336	45352	61664
Number of Code Blocks per Sub-Frame (see Note 3)			2	3	5	8	11
Binary Channel Bits Per Sub-Frame							
For Sub-Frames 1,2,3,4,6,7,8,9	Bits		11340	18900	41400	62100	82800
For Sub-Frame 5	Bits		n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
For Sub-Frame 0	Bits		8820	16380	38880	59580	80280
Max. Throughput averaged over 1 frame	Mbps		7.449	12.547	27.294	42.046	55.498
UE Category			1-5	2-5	2-5	2-5	3-5
Note 1:	2 symbols allocated to PDCCH for 20 MHz, 15 MHz and 10 MHz channel BW; 3 symbols allocated to PDCCH for 5 MHz and 3 MHz; 4 symbols allocated to PDCCH for 1.4 MHz						
Note 2:	Reference signal, synchronization signals and PBCH allocated as per TS 36.211 [4]						
Note 3:	If more than one Code Block is present, an additional CRC sequence of L = 24 Bits is attached to each Code Block (otherwise L = 0 Bit)						

Tabell 4.5-10: Normert LTE datarater for opplink ved 64QAM $\frac{3}{4}$, [30].

4.5.2.3. Rammestrukturer og modulasjonsparametere

Tabellen nedenfor gir en generell oversikt for modulasjonsparametere for LTE og Mobile WiMAX. Radioramme lengde for WiMAX er på 5 ms, og delramme lengde for LTE tilsvarer én (1) ms TTI tidsakse. Noen tall i tabell 4.5-6 er allerede illustrert ved beregninger på avsnitter 4.3.2.5 og 4.4.4.2.7 for Mobile WiMAX og LTE henholdsvis.

	Mobile WiMAX					3GPP LTE (E-UTRA)					
Frekvens Bånd	2.5 GHz										
Dupleks modus	TDD										
Modulasjon	4-QAM, 16-QAM, 64-QAM										
Båndbredde (MHz)	5	7	8.75	10	20	1.25	2.5	5	10	15	20
Samplingsfaktor	28/25	8/7	8/7	28/25	28/25	Se i tabell 4.4-13					
Delbærebølger mellomrom (kHz)	10.94	7.8125	9.766	10.94	10.94	15 (7.5 Utvidet CP for MBMS)					
FFT	512	1024			2048	128	256	512	1024	1536	2048
Ramme lengde / delramme lengde [ms]	2, 2.5, 4, 5, 8, 10, 12.5, 20 (WiMAX MTG støtter 5 ms)					1 (delramme fast lengde)					
Antall symboler / Ramme / delramme lengde	47	33	42	47	** 47	144 (for 20 MHz) (se Tabell 4.5-9, A5-1)					
Syklisk Prefiks, T_g [μ s]	11.4922	16	12.8	11.4922		4.69 (for symboler #1 - #6) 5.21 (for symbol #0) (for Normal CP) 16.7 (for symboler #0 - #5) (for Utvidet CP)					
	$G = [1/32, 1/16, 1/8, 1/4]$ ($T_g = G \times T_u$) *										
Symbol nyttig tid, T_u [μ s]	91.429	128	102.4	91.429		66.7					

Symbolstid, $T_s = T_u + T_g$ [μ s]	102.857	144	115.2	102.857	71.39 (for symboler #1 - #6) 71.91 (for symbol #0)
Bane lengde etter CP benyttet [Km]	3.43				1.4
	D = 3 x 10 ⁸ x CP : (dette er ingen celle størrelse, men lengde av signalvei ift lyshastighet)				
Synkronisering	Preamble (SFH, UL/DL-MAP, osv)				Bruker referanse signaler: Primaær og Sekundær synkronisering.
Delbærere Permutasjon	Obligatorisk ***				Nei
TTI [ms]	5 (for én delramme i dette tilfellet - type 1)				1 (én delramme)

Tabell 4.5-11: Tids- og Frekvens ressursenheter for rammestrukturering.

- * Sykliske prefikser varierer etter symbolperioder og forholdstall G, i tabellen er 1/8 brukt.
 ** Antall symboler per et 5 ms radioramme er illustrert ved figurer og beregninger i delkapittel 4.3.2.5.
 *** Disse feltene er obligatoriske for WiMAX profiler [wimax system evaluation methodology v2.1].

4.5.2.3.1. Kommentarer over modulasjonsparametere i tabell 4.5-11

4.5.2.3.1.1. Delbærere mellomrom

LTE har en fast delbærere på 15 kHz for alle kanalbåndbreddene. På den andre siden avhenger Mobile WiMAX av den valgte båndbredden, for eksempel er delbærere 10.9375 kHz benyttet 5, 10, og 20 MHz båndbreddene.

4.5.2.3.1.2. Syklisk Prefiks (CP)

på grunn av spredningsforsinkelse (f.eks. flerveis refleksjoner). Hvis den er for lang vil den redusere datakapasitet. Derfor må en systemdesigner foreta seg et viss kompromiss.

I LTE er to CP-alternativer definert: Normal- og Utvidede-CP, med 4.69 og 16.7 mikrosekunder henholdsvis. Den nyttige symbolperioden 66.7 μ s, og dette tilsvarer 7% Normal CP-lengde av den nyttige symbolperioden. LTE OFDM-symbollengden er på 71.4 μ s og 83.4 μ s for Normal- og Utvidede-CP henholdsvis.

På den andre siden har Mobile WiMAX et sett av 5 ulike CP-lengder som er definert ved produktet av forholdsfaktor (G) og den nyttige symbolperioden (se tabell 4.5-11). I tabellen er en CP på (1/8 * 91.429 μ s) benyttet over 5, 10, og 20 MHz kanalbåndbreddene.

5 Mobile WiMAX simulasjoner i OPNET

Frekvensspektrum og effekt er viktige radioressurser som begrenser trådløse nettverksytelse. For å dra bedre effektivitet må et kompromiss mellom disse to ressursene etableres. Kompromisset er for eksempel å kunne levere stor datamengde for minst mulig spektrumsallokering med et akseptabel effektsignal. Siden hver informasjonsbit må oppnå den tiltenkte mottaken med et viss signalnivå (over støysignalnivå), kan et nettverk ikke

optimalisere effekt- og båndbredde-effektivitet samtidig. Trådløse nettverker er hensiktsmessig bygget opp etter applikasjonstyper, deployeringsmiljø og tilgjengelige radioressurser. Dette innebærer en grundig avveining mellom båndbredde og effekt effektivitet. Trådløse nettverker beregnet for lav-datarates applikasjoner er som regel designet for å være mer energieffektiv, på den andre siden er trådløse nettverker for høy-datarates applikasjoner mer båndbredde effektiv. Det er allerede bevist i kapittel 4 at LTE er langt mer effektiv i båndbredde enn Mobile WiMAX. På den andre siden har WiMAX bedre dekningsområde enn LTE. Dette kapitlet presenterer simulasjonsresultater som kan benyttes for å evaluere Mobile WiMAX ytelse i den praktiske sammenhengen.

5.1. Bruker scenario

Det er en vanlig praksis å skille trådløse nettverkssimulasjoner i to nivåer: linknivå og systemnivå baserte simulasjoner. Linknivå simuleringer modellerer atferden til en enkelt kommunikasjonslink under en rekke kanalforhold over korte tidsskalaer, dette innebærer vanligvis å modellere alle aspekter på det fysiske laget og noen relevante MAC-aspekter. *Fysiske aspekter omfatter (1) en enkel topologi med en basestasjon, en mobilstasjon, og en forbindelsesnode mellom BS og en serverapplikasjon; (2) radiogrensesnitts aspekter som frekvensbånd, radioaksess-modus, modulering, osv. Protokoll eller MAC-aspekter omfatter (1) protokoll arkitektur, (2) modulering, (3) radiatoramme struktur.*

OPNET er blitt valgt som simuleringsomgivelse (se kap.3). Den har en spesifikke applikasjonsmodell for WiMAX. Modellen inkluderer en diskret hendelse simuleringsmodell som muliggjør analyse av nettverksytelse i det trådløse MAN-nettverket. WiMAX modelleapplikasjonen inkluderer IEEE 802.16e-2005 Std (kalt Mobile WiMAX) funksjoner. Legg merk at for å kunne kjøre simuleringer er det nødvendig å ha både trådløse modul og en lisens for den WiMAX-spesialiserte modellen. Lisensen for WiMAX muliggjør en å håndtere eller gjør noen eventuelle endringer i WiMAX prosessmodeller.

OPNET-leverandøren har fremstilt den spesialiserte Mobile WiMAX modellen med evner for å simulere i tillegg den 3GPP LTE-baserte radiogrensesnittsteknologien. Slik er det ikke sant. Årsaken er i hovedsak gitt av parametere som brukes for OFDM-fysiske profil oppbygging. En av grunnleggende parametere er delbærerebånd (som i OPNET er valgbar men ikke håndterbar – dvs. en kan ikke fårandre de listet tallverdiene). På den andre siden er frekvensdeling (permutation zones) som tar effekter uansett i kanal datamengde utforming, dette er fullstendig ukompatibel med 3GPP LTE OFDM PHY. Dette er blitt konstatert i løpet av mine simulasjoner, se bruksanvisning for detaljer.

Simulasjon av to ulike radioaksessteknologier i samme plattform er en viktig forutsetning for å unngå flere bivirkninger. Dette gir en rettferdig RAT ytelse sammenligning. Derfor har jeg bestemt å ikke foreta 3GPP LTE PHY lag simuleringer med noen andre plattform.

For Mobile WiMAX simulasjon er følgende scenariene gjennomført:

- A. Utgangspunktet er å etablere scenario for en enkelt teste ved å benytte et "test case" hentet i [23] for linkbaserte budsjett simulering. System parametere, OFDMA parametere, og propagasjonsmodellen for dette referansesystemet er oppført i Tabell 5.3-1. Sertifiseringsprofilen er 10 MHz båndbredde.

- B. Ut fra referansesystemet er Mobile WiMAX simuleringsytelse evaluert. Data gjennomstrømnings resulterende fra simulasjoner er sammenlignet med teoretiskbaserte verdier i kapittel 4. Merk at Test Caset benytter to senderantennor på nedlink, så er SIMO oppsetting benyttet for simulasjoner.
- C. Neste steg, er å utføre noen rammebaserte modifikasjoner og permutasjons parametere som er gitt i Tabell 5.3-1. Hensikten med dette er å analyse innvirkning av disse parametere over datakapasitet og/eller båndbredde effektivitet. For eksempel er Gjennomstrømning vs Syklisk Prefiks (CP) simulert ved et fast punkt innen en celle.

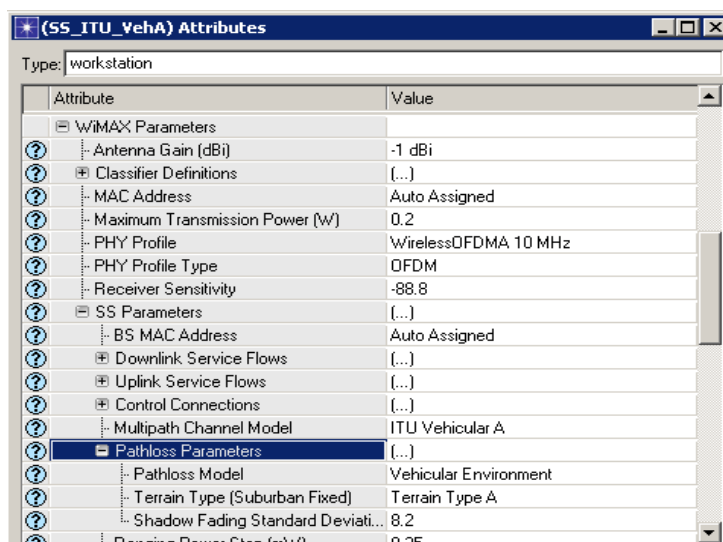
WiMAX Forum har identifisert flere applikasjoner for IEEE Std 802.16e-2005 baserte nettverker. Applikasjonene er organisert i tabellen nedenfor, samt retningslinjer for ventetid og jitter som sikrer en god brukeropplevelse. Det finnes en kort illustrasjon om hvordan er disse applikasjonene konfigurert i Opnet (se vedlegg A.4). Merk at Basestasjons dataprosessor i Opnet produserer datapakker som overføres til mottakeren gjennom den trådløse kanalen ved å benytte datagram innsatt av disse MAC-tjenester.

Class	Application	Bandwidth Guideline		Latency Guideline		Jitter Guideline	
		Low	High	Low	High	Low	High
1	Multiplayer Interactive Gaming	Low	50-85 kbps	Low	< 150 msec	Low	<100 msec
2	VoIP & Video Conference	Low	4-384 kbps	Low	< 150 msec	Low	<50 msec
3	Streaming Media	Low to High	5 kbps to 2 Mbps	N/A		Low	<100 msec
4	Web Browsing & Instant Messaging	Moderate	10 kbps to 2 Mbps	N/A		N/A	
5	Media Content Downloads	High	> 2 Mbps	N/A		N/A	

Tabell 5.1-1: WiMAX applikasjonklasser, ([23] table 3.1).

5.2. Kanal modell

Kanalmodellen mellom sender- og mottakerantennor er SIMO (Single Input Multiple Output). ITU-A flerveikanal modell og Kjøretøy banetap modell er benyttet sammen med en skygge margin på 8.2 dB for å produsere det samme banetapet avgitt i Test Caset. OPNET benytter ITU og Erceg modellene som referansesimulasjons modeller. For å reprodusere de samme simulasjonsresultatene fra "test case" i [23] som benytter COST 231-Hata modell, er flg oppsetting lagt til grunn for simulasjoner: *Multipath Channel model* er **ITU Vehicular A**, Pathloss parametere er **Vehicular Environment** med *Shadow Fading Std Deviation* på **8.2 dB**, se figuren nedenfor.



Figur 5.2-1: Kanalmodell konfigurasjon i OPNET. Shadow Fading margin er valgt i funksjonen av analyser gjort over ulike Multipath og Pathloss modeller ved hjelp av Matlab, se figur B-6.

5.3. Forutsetninger og parametere valg

Tabellen nedenfor lister opp de grunnleggende simuleringsforutsetninger og parametere som benyttes for WiMAX ytelsestudier. Fokus settes på 2.5 GHz med 10 MHz båndbredde. Andre profiler nemlig fem, og 20 MHz båndbredder er satt sammen i tabellen for sammenligningsformål.

Parameter	Mobile WiMAX		
System parametere			
Nettverk	Antall Celler	1	
	Antall Sektorer	1	
	Frekvens Bånd [GHz]	2.5	
	Dupleks modus	TDD	
Base Stasjon	BS Effekt, (dBm)	43	
	BS høyde (meter)	32	
	BS Gain, (dBi)	15	
	BS Antenner (TX x RX)	(1 x 1)	
Mobile Stasjon	MS Effekt, (dBm)	23	
	MS høyde, (meter)	1.5	
	MS Gain (dBi)	-1	
	MS Antenner	(1 x 1)	
BS-til-MS max. Avstand	Celle Størrelse [Km]	1.6	
BS-til MS min. Avstand	[meter]	36	
OFDM Parametere			
Profil /Kanal BW [MHz]	5	10	20
FFT	512	1024	2048
Delbærebølger mellomrom	10.9375 kHz		

Nyttig Symbolstid, T_u [μ s]	91.429				
Ramme Parametere					
Delramme lengde [ms]	5				
Forhold av DL-til-UL	3:1 (UL=12 symb, DL=35 symb.)				
Symbol periode / CP / Antall OFDM symboler	G	Syklisk Prefiks, $T_g = G \cdot T_u$ [μ s]	T_s [μ s]	No. OFDM symboler	TTG + RTG [μ s]
	1/4	22.857	114.286	42	199.98
	1/8	11.429	102.857	47	165.714
	1/16	5.714	97.143	50	142.853
	1/32	2.86	94.29	52	96.92
Permutasjon Parametere					
SC-Permutasjon (DL,UL)	(PUSC, PUSC)				
Antall Null SC	DL:(V/H) /UL:(V/H)	(46/45)/(52/51), 92/91 , 184/183			
Antall BS_{SC}^{**} Data SC=Brukt SC- Pilot SC	Brukt SC		440, 840, 1440		
	DL data SC		360, 720 , 1440		
	TU	Pilot SC		140, 280, 560	
		Data SC		280, 560, 1120	
		Test Case (for 10 MHz)		Allokerte SC	192
		Allokerte Data SC	128		
No.data SC i hvert symbol per MS Tx-delkanal	24				
Antall delkanal (DL,UL)	(15, 17) , [(30, 35), (Test case: 7, 8), (60, 70)				
PermBase (DL)	4, 6 , 12				
Propagasjons Parametere					
Bærefrekvens, (GHz)	2.5				
Pathloss modell	Vehicular environment (se vedlegg B.2.1/2)				
Flervei kanal modell	ITU-A				
Lognormal shadow dev.	(8.2 dB) 10 dB (rekommendasjon av WiMAX Forum, [25])				
MAPL (Bane-tap) [dB]	128.2 (16-QAM ½) [23]				
Andre Parametere					
MS hastighet [kmph]	3 (Ped B og Ped A) 30 og 120 (Veh A)				
QoS	BE, rtPS, UGS, ErtPS (se tabell 4.2-9)				
Multi antenne	STC (2 x 1) – Alamouti på BS				
MIMO	Ikke tilgjengelig i OPNET				
Kanalkoding	CC, CTC				
HARQ, maks. No. Transmisjon	4				
BS/MS følsomhet (dBm)	-111.1 / -88.8 (for 16-QAM ½) [26]				
Repetisjonsfaktor	2, 4 , 6				
Modulasjon	QPSK, 16-QAM, 64-QAM				
Simulasjonstid	6 min (gjennomsnitt)				

Tabell 5.3-1: Nedlink og opplink simulasjonsparametere for Mobile WiMAX i OPNET, [23].

**

 $BS_{sc-data} = (\text{No.data SC i hvert symbol}) \times (\text{Antall delkanal}).$

Antall OFDM-symboler i nedlink og opplink for TDD når 5 ms delrammen er benyttet. Merk at kapasiteten reguleres etter kanalbåndbredde. Tabellen nedenfor viser hvordan dette kan kombineres.

	Kanal båndbredde	(DL,UL) symboler
1	5 og 10 MHz	(47 - n, n), $12 \leq n \leq 21$
2	8.75 MHz	(47 - n, n), $12 \leq n \leq 18$
3	7 og 3.5 MHz	(33 - n, n), $9 \leq n \leq 15$

Tabell 5.3-2: (DL:UL) forhold for TDD i WiMAX, ([23], table 1.2.3).

5.3.1. Generell formel for mottakers følsomhet, R_{SS}

Det minimale mottakers følsomhetsnivået er gitt etter formelen (166) på [8] og den er gjengitt nedenfor:

$$R_{SS} = -144 + \text{SNR}_{R_x} - 10 \times \log_{10}(R) + 10 \times \log_{10}\left(\frac{F_S \times N_{used} \times 10^{-6}}{N_{FFT}}\right) + \text{ImpLoss} + \text{NF}, \text{ der:}$$

SNR_{R_x} : er mottakers SNR som vist i ([8], table 545) .

R: er repetisjonsfaktor i [8], delkapittel 8.4.9, (2x, 4x, eller 6x).

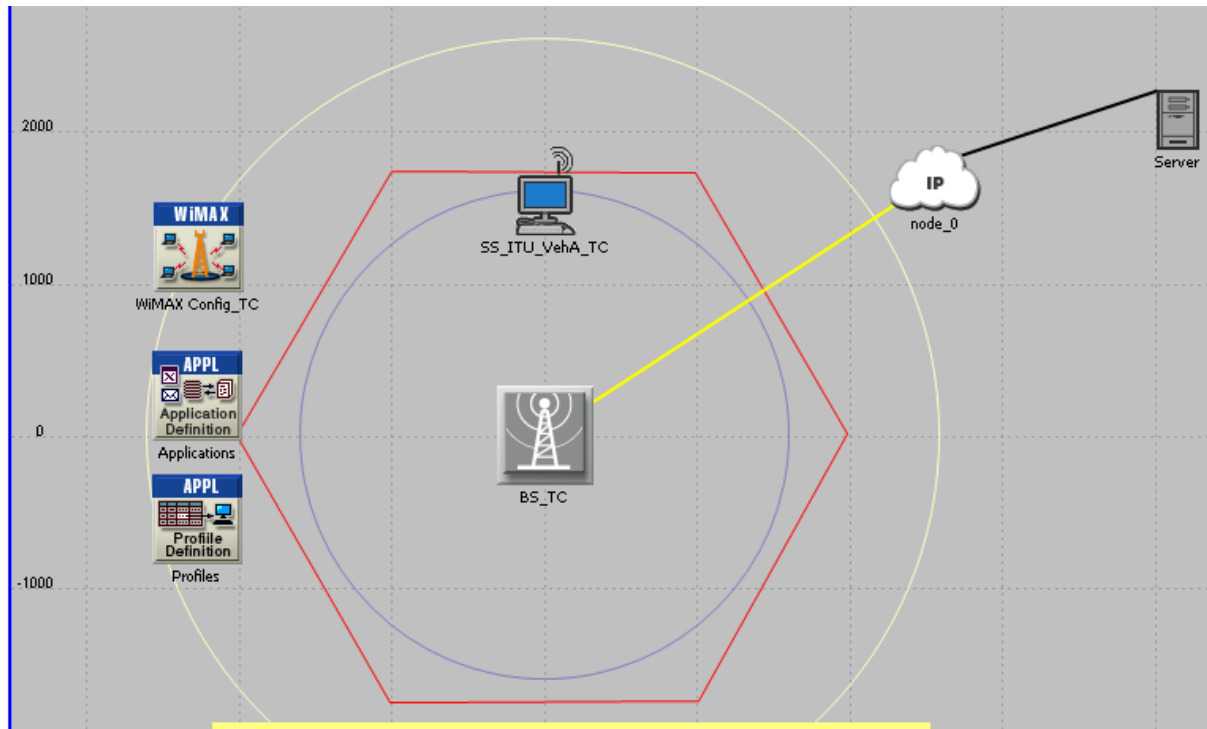
F_S : er samplingsfrekvensen i Hz.

ImpLoss: er implementasjonstapp, hvilken inkluderer den ikke-ideelle mottakersvirkningen som for eksempel kanalestimeringsfeil, takttilpasningsfeil (tracking), kvantiseringsfeil, og fasestøy. Dette antas å være i 5 dB.

NF: er mottakers støyfaktor (noise figure), referert til antenne port. Verdien anslås å være rundt 8 dB.

5.4. OPNET scenario

Avhengig av formål kan et Opnet scenario bygges av én eller mange celler med ulike noder (BS, MS, Server, IP noder, statiske noder for nett konfigurasjon, osv). For mobilitetssimuleringer er trajektorie også inkludert, den definerer MS bevegelsesprofil. Fysiske lenker kan også benyttes, de kopler sammen to noder. Figur 5.4-1 viser scenario som blir benyttet for alle simulasjoner i dette arbeidet. En mobilstasjon er simulert i et makrocelle Suburban miljø (Test Case).



Figur 5.4-1: Opnet scenario. Én celle, og én sektor: sju noder, to lenker. Legg spesiell merk på heksagonal celle. Se innføring på vedlegg A for noders oppsetting.

5.4.1. "Test case" Scenario og simulasjonsresultater

Test tilfellet oppsetting:

- Alle parametere i Tabell 5.3-1 skal benyttes både for "Test case" og reste av simulasjonsscenarioene. Det er viktig å undertrekke at på steder i tabellen som viser flere alternativer, skal fetfargede tall gjelde.
- Målet i dette tilfellet er å bestemme Maksimale Bane-tapet påkrevet i "Test Case" linkbudsjett, og maksimal bitraten ved cellerand: Relevante målverdiene er: System Gain = 147.8 dB, MAPL = 128.2 dB (ved 16-QAM ½), DL trafikk Data Rate = 5.76 Mbps, og UL trafikk Data Rate = 102 Kbps. Verdiene er målt ved celleranden som er på 1.6 Km.
- Cellerand er system gain basert (dvs. System gain = EIRP – (RX-følsomhet) – Rx antenne gain). System gain brukes så inn i formelen for ITU vehicular banetaps modell avgitt i avsnitt B.2.2. Banetapsverdien er avgitt i tabell 5.4-1.
- Figur 5.4-1 viser Test scenario i OPNET.

Tabellen nedenfor viser parametere for "Test Case" med COST231-Hata, og "ITU VehA i OPNET". Simuleringsresultater etter 6 minutter simulasjonstid ligger nedre i tabell 5.4-1. Se også den fullstendige OPNET-konfigurasjonen for dette test-tilfellet i vedlegg A.4.

Parameter (Mobile WiMAX DL)	Test Case [23] COST 231	OPNET ITU VehA	Notes
Tx Power/Antenna Element	40 dBm	31.2 dBm	A1
No.of Tx Antenna Element	2	2	A2
Cyclic Combining Gain	3 dB	-	A3
Tx Antenna Gain	15 dBi	15 dBi	A4
Pilot Power Boosting Gain	-0.7 dB	-	A5
EIRP	57.3 dBm	49.2 dBm	A6: A1+A8+A4+A5
Base Permutation Zone	PUSC	PUSC	Subchannelization
No.of Occupied Sub-Carriers	840/192	840/192	DL/UL (Data + Pilot SubCarriers)
Power of Occupied Sub-Carriers	28.1 dBm	-	OPNET (?)
Mobile Unit (Handset Indoor)			
Tx Power (1 antenna Element)	23 dBm(0.2 W)	13dBm(.02 W)	Min. Opnet value (measured)
Rx Antenna Gain	-1 dB	-1 dB	A7
Rx Antenna Diversity Gain (2 Antenna)	3 dB	3 dB	A8: $10 \log_{10}(A2)$
Rx Noise Figure	7 dB	7 dB	A9
Margins			
Log Normal Fade Margin	5.56 dB	8.2 dB	A10
Fast Fade Margin	6 dB	-	A11
Interference Margin	2 dB	-	A12
Penetration Loss	10 dB	-	A13
Total Margin	23.56 dB	8.2 dB	A14
Mobile Rx Sensitivity			
Thermal Noise	-174 dBm/Hz	-174 dBm/Hz	A15
Channel Bandwidth	10 MHz	10 MHz	A16
Sub-Carrier Spacing	10.94 kHz	10.94 kHz	A17
Receiver Noise Level	-104 dBm	-104 dBm	A18: $A15+10\log_{10}(A16 [Hz])$
Modulation	16QAM $\frac{1}{2}$	16-QAM $\frac{1}{2}$	A19
MS Required SNR	8.93 dB	**	A20: for 16QAM $\frac{1}{2}$ in COST231-H
DL Traffic Data Rate	5.76 Mbps	**	A21: ** to be measured
Rx Sensitivity (per Sub-Carrier)	-117.7 dBm	-	A23:
Rx Sensitivity (Composite)	-88.8 dBm	-88.8 dBm	A24: A18+A9+A20 + A5
System Gain	147.8 dB	139 dB (131.4 dB)	A25: $A6 - (A24+A7+A5)$ (Opnet measured value)
Maximum Allowed Path Loss	128.2 dB	128.2 dB	A26: $A25 - A10 - A11 + A12 - A13$
Results: Test Case versus OPNET-simulations			
Cell Size [Km]	1.6	1.6	Cell size closed to System Gain
Propagation model	COST 231 Suburban	ITU VehA Se figur 5.2-1	
MS Required SNR [dB]	8.93	9.65	The Opnet value is measured
BS Required SNR [dB]	-2.5	0.19	The Opnet value is measured
DL Trafikk Data Rate [Mbps]	4.32	4.972 (13% bigger)	Tot. DL Traffic Data Rate (
UL Trafikk Data Rate [Kbps]	102.0	172.4	Tot. UL Traffic Data Rate (Data:171, overhead:1.4)
MAPL (Bane-tap) [dB]	182.2	128.21	Opnet: after 8.2 dB shadow insert.

Tabell 5.4-1: Test Case – WiMAX versus mine simulasjoner i OPNET [23]. Tabellen er gjengitt slik den vises i referansen. Resultater tilføyes i tabellen for sammenligning.

5.4.1.1. Diskusjon

Tabell 5.4-1 viser resultater etter simulasjonen i OPNET når TC (Test Case) parametere er benyttet. Trafikk datarater for opplink og nedlink er illustrert i tabell 5.4-2. Detaljert informasjon om TC kan også finnes i ([23], Annex H). Den nedlink simulasjonen gir dataraten 13% høyere enn verdien avgitt i WiMAX TC. Nedlink (DL) data gjennomstrømning akseptert ved "celleranden" er 4.9720 Mbps. Opplink simulering med Opnet viser 172.4 Kbps (0.6% høyere) mot 102.0 Kbps av TC.

OPNET tilbyr en rekke alternativer for å modellere flerveikanal og banetapsmodell. Derfor er MAPL (Maximal Allowable PathLoss) oppnådd ved å legge til en fading margin på 8.2 dB over ITU Vehicular A. For å få tilnærmet dararater for DL og UL måtte (DL:UL) radiatoramme forholdsfaktor reguleres til (25% symboler i radiatoramme), samt er også flere MAC tjenesteklasser benyttet for å generere tilstrekkelige datapakker. Oppsetting av disse klassene er illustrert i vedlegg A.4. OPNET har også funksjonalitet for å generere Webrapporter for hver enkel simulasjonen.

Merk at **UL/DL Boundary** attributt regulerer størrelse (i symboler) for UL delramme i enhver radiatoramme. OPNET Modellen tillater ikke en DL delramme som er mindre enn 25% av symboler i radiatorammen. Derav alle UL delramme konfigurasjoner som viser seg å være større enn 75% av radiatorammen vil bli redusert til eller litt under 75% av radiatorammen. Dette påvirker i stor grad resultater som oppnås ved ekstreme ramme-konfigurasjoner (f.eks. 1:0, 0:1).

	Service Subscriber	Direction	Class	Scheduling Type	Requested BW (bps)	Polling Overhead (bps)	Admitted BW (sps)	Modulation	Coding Rate
1	SS_ITU_VehA_TC	Uplink	Basic Control Class	BE	32,000	N/A	N/A	QPSK	1/2
2	SS_ITU_VehA_TC	Downlink	Basic Control Class	BE	32,000	N/A	N/A	QPSK	1/2
3	SS_ITU_VehA_TC	Uplink	System Default	BE	0	N/A	N/A	QPSK	1/2
4	SS_ITU_VehA_TC	Uplink	Broadcast	BE	0	N/A	N/A	QPSK	1/2
5	SS_ITU_VehA_TC	Uplink	Blue Class	rtPS	246,000	984	248,000	QPSK	1/2
6	SS_ITU_VehA_TC	Downlink	System Default	BE	0	N/A	N/A	QPSK	1/2
7	SS_ITU_VehA_TC	Downlink	Platinum	rtPS	1,160,000	N/A	582,400	16-QAM	1/2
8	SS_ITU_VehA_TC	Downlink	Gold	rtPS	1,500,000	N/A	753,000	16-QAM	1/2
9	SS_ITU_VehA_TC	Downlink	Silver	rtPS	1,500,000	N/A	753,000	16-QAM	1/2
10	SS_ITU_VehA_TC	Downlink	Bronze	rtPS	390,000	N/A	195,800	16-QAM	1/2
11									
12	Total				4,860,000	984	2,532,200		

(UL Zones) Table		(DL Zones) Table		(UL/DL Boundary) Table	
Attribute	Value	Attribute	Value	Attribute	Value
Zone Extent (%)	100	Zone Extent (%)	100	Boundary Position	Fixed
Number of Null Subcarriers Left	92	Number of Null Subcarriers Left	92	UL Subframe Size (symbols)	12
Number of Null Subcarriers Right	91	Number of Null Subcarriers Right	91		
Number of Data Subcarriers	128	Number of Data Subcarriers	336		
Number of Subchannels	8	Number of Subchannels	7		
Usage Mode	PUSC	Usage Mode	PUSC		

Tabell 5.4-2: Trafikk datarater simulerte for nedlink og opplink.

Innholdet i tabellen (rad 12) er sammenlignet mot "Test Case". Legg merk at den riktige dataraten [bps] er gitt av "Admitted BW" [sps = symbols per second]. Bitraten er produkt av symbolraten med (to info biter per symbol for 16QAM 1/2, og én info bit per symbol for QPSK 1/2) for å få bitraten. Se den generelle formelen ved tabell 4.5-5.

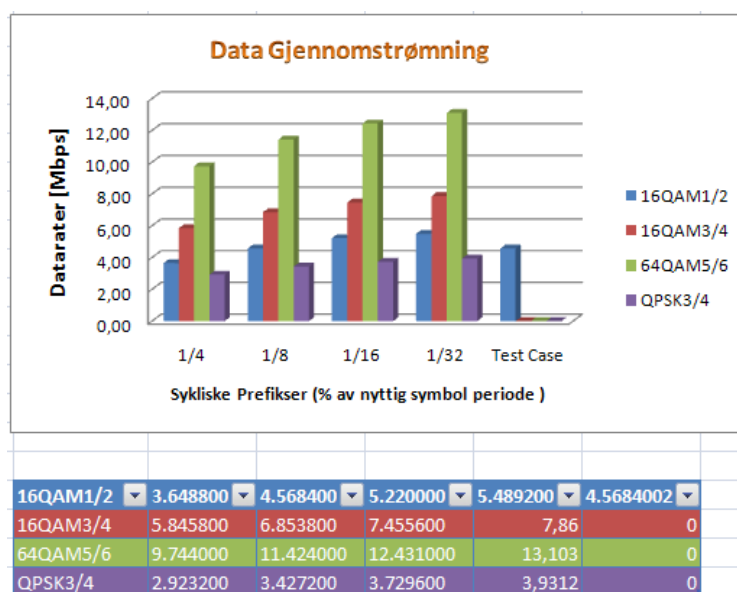
Tilgjengelige data delbærere for UL og DL soner er fortsatt konfigurert som i tabell 5.4-2. Hvis UL/DL forholds faktor forandres, vil data allokering kapasitet forandres i den samme proporsjonen. I dette tilfellet er ”UL/DL Boundary” flyttet fra (12/36) til (9/37 – dette ifølge Opnet justeres automatisk til 25%).

Service Subscriber	Direction	Class	Scheduling Type	Requested BW (bps)	Polling Overhead (bps)	Admitted BW (sps)	Modulation	Coding Rate
1 SS_ITU_VehA_TC	Uplink	Basic Control Class	BE	32,000	N/A	N/A	QPSK	1/2
2 SS_ITU_VehA_TC	Downlink	Basic Control Class	BE	32,000	N/A	N/A	QPSK	1/2
3 SS_ITU_VehA_TC	Uplink	System Default	BE	0	N/A	N/A	QPSK	1/2
4 SS_ITU_VehA_TC	Uplink	Broadcast	BE	0	N/A	N/A	QPSK	1/2
5 SS_ITU_VehA_TC	Uplink	Blue Class	rtPS	171,000	684	172,400	QPSK	1/2
6 SS_ITU_VehA_TC	Downlink	System Default	BE	0	N/A	N/A	QPSK	1/2
7 SS_ITU_VehA_TC	Downlink	Platinum	rtPS	1,160,000	N/A	582,400	16-QAM	1/2
8 SS_ITU_VehA_TC	Downlink	Gold	rtPS	1,500,000	N/A	753,000	16-QAM	1/2
9 SS_ITU_VehA_TC	Downlink	Silver	rtPS	1,500,000	N/A	753,000	16-QAM	1/2
10 SS_ITU_VehA_TC	Downlink	Bronze	rtPS	792,000	N/A	397,600	16-QAM	1/2
11								
12 Total				5,187,000	684	2,658,400		

*(UL Zones) Table		*(DL Zones) Table		*(UL/DL Boundary) Table	
Attribute	Value	Attribute	Value	Attribute	Value
Zone Extent (%)	100	Zone Extent (%)	100	Boundary Position	Fixed
Number of Null Subcarriers Left	92	Number of Null Subcarriers Left	92	UL Subframe Size (symbols)	9
Number of Null Subcarriers Right	91	Number of Null Subcarriers Right	91		
Number of Data Subcarriers	128	Number of Data Subcarriers	336		
Number of Subchannels	8	Number of Subchannels	7		
Usage Mode	PUSC	Usage Mode	PUSC		

Tabell 5.4-3: Maksimal datarate ved å benytte Test Caset i OPNET.

5.4.2. Gjennomstrømning versus Syklisk Prefiks (CP)



Figur 5.4-2: Datarater vs CPs.

Ekstra informasjon og sykliske prefiksene er inkludert i den totale data kapasiteten.

5.4.3. Simulasjon med standard oppsetting

Mening med standard oppsetting er å benytte følgende parametere: alle tilgjengelige data delbærere både på DL og UL, 5 ms radiatoramme med CP-lengde på 1/8 del av den nyttige symbolperioden, en 3:1 asymmetrisk data kapasitetsfordeling (dvs. 25 % for UL), DL mod 64QAM 5/6 og UL 16QAM 3/4. Alle parametere (OFDM, Radioramme, og permutasjonssoner) er avgitt i tabell 5.3-1 over. Først skal vi se på to ekstreme tilfeller, der alle radiatoramme symboler er enten allokeret til DL delramme eller til UL delramme.

Service	Subscriber	Direction	Class	Scheduling Type	Requested BW (bps)	Polling Overhead (bps)	Admitted BW (sps)	Modulation	Coding Rate
1	SS_ITU_VehA_Std_MS	Uplink	System Default	BE	0	N/A	N/A	QPSK	1/2
2	SS_ITU_VehA_Std_MS	Uplink	Broadcast	BE	0	N/A	N/A	QPSK	1/2
3	SS_ITU_VehA_Std_MS	Downlink	System Default	BE	0	N/A	N/A	QPSK	1/2
4	SS_ITU_VehA_Std_MS	Downlink	Platinum	rtPS	5,000,000	N/A	1,004,200	64-QAM	0.833
5	SS_ITU_VehA_Std_MS	Downlink	Gold	rtPS	10,000,000	N/A	2,008,200	64-QAM	0.833
6	SS_ITU_VehA_Std_MS	Downlink	Silver	rtPS	5,000,000	N/A	1,004,200	64-QAM	0.833
7	SS_ITU_VehA_Std_MS	Downlink	Bronze	rtPS	10,000,000	N/A	2,008,200	64-QAM	0.833
8	SS_ITU_VehA_Std_MS	Downlink	Diamond	rtPS	2,266,930	N/A	455,200	64-QAM	0.833
9									
10	Total				32,266,930	0	6,480,000		

Attribute	Value
Zone Extent (%)	100
Number of Null Subcarriers Left	92
Number of Null Subcarriers Right	91
Number of Data Subcarriers	560
Number of Subchannels	35
Usage Mode	PUSC

Attribute	Value
Zone Extent (%)	100
Number of Null Subcarriers Left	92
Number of Null Subcarriers Right	91
Number of Data Subcarriers	720
Number of Subchannels	30
Usage Mode	PUSC

Attribute	Value
Boundary Position	Fixed
UL Subframe Size (symbols)	1

Tabell 5.4-4: DL maksimal datarate med (DL=1 : UL=0) konfigurasjon, (se tabell 4.5-7). Dataraten målt er 32.4 Mbps og tilsværer 75 % av den totale DL kapasiteten (se Opnet grense på 5.4.1.1).

Service	Subscriber	Direction	Class	Scheduling Type	Requested BW (bps)	Polling Overhead (bps)	Admitted BW (sps)	Modulation	Coding Rate
1	SS_ITU_VehA_Std_MS	Uplink	System Default	BE	0	N/A	N/A	QPSK	1/2
2	SS_ITU_VehA_Std_MS	Uplink	Broadcast	BE	0	N/A	N/A	QPSK	1/2
3	SS_ITU_VehA_Std_MS	Uplink	Blue Class	rtPS	5,000,000	20,000	1,693,400	16-QAM	3/4
4	SS_ITU_VehA_Std_MS	Uplink	Silver	rtPS	5,000,000	20,000	1,693,400	16-QAM	3/4
5	SS_ITU_VehA_Std_MS	Uplink	Diamond	rtPS	1,404,320	5,618	475,600	16-QAM	3/4
6	SS_ITU_VehA_Std_MS	Downlink	System Default	BE	0	N/A	N/A	QPSK	1/2
7									
8	Total				11,404,320	45,618	3,862,400		

Attribute	Value
Zone Extent (%)	100
Number of Null Subcarriers Left	92
Number of Null Subcarriers Right	91
Number of Data Subcarriers	560
Number of Subchannels	35
Usage Mode	PUSC

Attribute	Value
Zone Extent (%)	100
Number of Null Subcarriers Left	92
Number of Null Subcarriers Right	91
Number of Data Subcarriers	12
Number of Subchannels	1
Usage Mode	PUSC

Attribute	Value
Boundary Position	Fixed
UL Subframe Size (symbols)	48

Tabell 5.4-5: UL maksimal datarate med (DL=0 : UL = 1) konfigurasjon, (se tabell 4.5-7). Dataraten målt er 11.5872 Mbps.

Service	Subscriber	Direction	Class	Scheduling Type	Requested BW (bps)	Polling Overhead (bps)	Admitted BW (bps)	Modulation	Coding Rate
1	SS_ITU_VehA_Std_MS	Uplink	System Default	BE	0	N/A	N/A	QPSK	1/2
2	SS_ITU_VehA_Std_MS	Uplink	Broadcast	BE	0	N/A	N/A	QPSK	1/2
3	SS_ITU_VehA_Std_MS	Uplink	Blue Class	rtPS	4,129,000	16,516	1,398,400	16-QAM	3/4
4	SS_ITU_VehA_Std_MS	Downlink	System Default	BE	0	N/A	N/A	QPSK	1/2
5	SS_ITU_VehA_Std_MS	Downlink	Platinum	rtPS	5,000,000	N/A	1,004,200	64-QAM	0.833
6	SS_ITU_VehA_Std_MS	Downlink	Gold	rtPS	10,000,000	N/A	2,008,200	64-QAM	0.833
7	SS_ITU_VehA_Std_MS	Downlink	Silver	rtPS	3,000,000	N/A	602,600	64-QAM	0.833
8	SS_ITU_VehA_Std_MS	Downlink	Bronze	rtPS	2,661,300	N/A	534,400	64-QAM	0.833
9	SS_ITU_VehA_Std_MS	Downlink	Diamond	rtPS	3,000,000	N/A	602,600	64-QAM	0.833
10									
11	Total				27,790,300	16,516	6,150,400		

Attribute	Value
Zone Extent (%)	100
Number of Null Subcarriers Left	92
Number of Null Subcarriers Right	91
Number of Data Subcarriers	560
Number of Subchannels	35
Usage Mode	PUSC

Attribute	Value
Zone Extent (%)	100
Number of Null Subcarriers Left	92
Number of Null Subcarriers Right	91
Number of Data Subcarriers	720
Number of Subchannels	30
Usage Mode	PUSC

Attribute	Value
Boundary Position	Fixed
UL Subframe Size (symbols)	13

Tabell 5.4-6: Standard konfigurasjon (DL=3 : UL=1) i Opnet.

Sertifiseringsprofilen i 10 MHz båndbredde er benyttet i denne simuleringen og gir følgende datarater: 4.1952 Mbps for opplink og 23.76 Mbps for nedlink. Disse resultatene er i samsvar med verdiene avgitt i tabell 4.5-7.

Sertifiseringsprofilen i 20 MHz båndbredde ble også simulert. Simulasjonsresultater viser følgende maksimale DL/UL datarater: 64.8 Mbps/29.2 Mbps henholdsvis.

6. Evaluering

I dette kapitlet skal vi se nærmere på en del parametere med stor innflytelse i forbindelse med fremtidige mobilkommunikasjons systemer. Vi skal se på hvordan parametere henger sammen i slike systemer, og hva bør legges stor vekt for mobile bredbåndssystemer dimensjonering.

6.1. Frekvensspektrum versus Rekkevidde

Multimedia og en rekke andre tjenestebaserte applikasjoner stiller spesielle krav til et bredbånd kommunikasjonssystem. Først og fremst må slike systemer ha kapasitet til å håndtere og overføre høye datastrømmer fra en senders til en mottakers side. Fremtidige mobilsystemer skal som regel operere i frekvensbånd over 2 GHz (se tabell 2.4-1). Videre vil datastrømmen oppleve mer dempningsnivå på signalstyrke i dette frekvensbåndet som igjen ender med reduserte rekkevidde. IMT-A definerer bærefrekvenser etter deployeringsscenarioet for hvilket kommunikasjonssystem er implementert. Bærefrekvensen er omvendt proporsjonalt med rekkevidde (eller cellestørrelse). Slik som vist i tabell 2.3-2, er et urban mikrocellescenario evaluert i bærefrekvens på 2.5 GHz mens for urban makrocelle er den utvalgte bærefrekvensen på 2.0 GHz. Dette gir mening for meg, fordi høyere frekvenser kan lett gjennomtrengte vegg og andre innendørshindringer som karakteriserer små celler (f.eks. kontorer). I motsetning til lavere frekvenser (innenfor IMT bånd) er høyere frekvenser problematisk i utendørsmiljø (f.eks. by område) på grunn av mindre bølgelengde de er karakteriserte av. Videre er utendørsmiljø karakteriserte av skygge (trær og andre objekter),

bygningshjørner og andre reflekterende objekter, derfor vil lavere frekvenser skape forholdsmessig mindre dempningsnivå på signal i denne type radiobølge utbredelsen. På den andre siden, vil BS og MS i små celler karakteriseres av mindre sendereffekt enn i middel/store celler (se tabell 2.3-2). Frekvens gjenbruk vil lettere implementeres i små celler på grunn av sine karakteristikk over, spesielt i store kjøpesentere, kontorer og lignede. Dessuten vil frekvensskift mellom to forskjellige deployeringsscenarier (f.eks. innendørs- til utendørsmiljø eller omvendt) gjøre livet vanskelig for små enheter som mobilstasjoner. For å skape et interferens fri system, er det anbefalt at mobilstasjonen må kunne håndtere arbeidsfrekvensskift, effektstyring og andre styringssignaler på en effektiv måte når den befinner seg i en overgangssone mellom to scenarier.

6.2. Delbærere og Syklisk Prefiks versus rekkevidde

Ytelsen av OFDM og OFDMA systemer avgjøres av noen viktige parametere. Derfor må noen kompromisser gjøres for å definere disse parametrene for så å maksimere spektralet av systemet, og samtidig opprettholde robusthet mot fenomener som forstyrrer utbredelse av radiosignal. Ved utforming av et OFDM-system må følgende tas i betraktning: den forventede spredtforsinkelsen (T_d), den maksimale Doppler frekvensen (f_{dmax}), og i tilfellet av mobilnett-systemer må den målrettede celle størrelsen tas til betraktning. Disse tre egenskapene introduserer visse begrensninger på valg av Syklisk Prefiks (CP)-lengde og på delbærere-mellomrommet (Δf). CP-lengden er bestemt av den høyeste forventede spredt- forsinkelsen av et radiosignal i en kanal. Derfor skal CP-et være lengre enn kanalens impulsrespons for å sikre robusthet mot ISI. For mobilnett systemer og spesielt for store celler oppleves vanligvis lengre spredt-forsinkelse enn i for eksempel WLAN-systemer, og dette er noe som tyder på behovet for lengre CP i OFDM-baserte store celler. På den andre siden, tilsvarer en lang CP-periode for et gitt OFDM-symbol økning av ekstrainformasjon (overhead). Denne økningen kan defineres i form av energitap per overført bit. Det er klart at ved maksimering av spektral effektivitet bør den nyttige OFDM-symbolperioden (T_u) velges større i forhold til CP-perioden, men liten nok til å sikre at kanalen ikke varierer innen ett OFDM-symbol. Dessuten har CP-lengden fordeler av å muliggjøre en effektiv kanalestimering i tillegg til timing og frekvens synkronisering [18]. Videre er en T_u knyttet til delbærere-mellomrommet ved $\Delta f = 1 / T_u$. Valget av en stor T_u vil føre til et mindre Δf , som har en direkt innvirkning på systemets følsomhet for Doppler og andre kilder for frekvens offset. Dermed kan tre kriterier defineres:

$$\begin{aligned} T_{CP} &\geq T_d && \text{for å hindre ISI.} \\ (F_{d-max} / \Delta f) &\ll 1 && \text{for å holde ICI tilstrekkelig lav på grunn av Doppler.} \\ T_{CP} \Delta f &\ll 1 && \text{for spektral effektivitet.} \end{aligned}$$

Vi har sett at både LTE og WiMAX benytter konvensjonelle OFDMA system med en statisk sikkerhetstidslengde (eng. Guard Time). Dette holdes vanligvis fire ganger mer enn RMS kanalens spredtforsinkelse for å bekjempe verste kanalforhold, (f.eks. en CP=16.7 us, og ITU fotgjenger utendørs-til-innendørs kanal-B med 3700 ns forsinkelse – se vedlegg i tabell B-5). I et typisk mobilmiljø er kanalens spredtforsinkelse ikke konstant. Derfor kan en fast CP-lengde tvinge enheter som møter mindre spredtforsinkelse til å bruke unødvendig store CP-lengde. Dette fører til et betydelig tap i spektraleffektivitet og samtidig systems energitap. Siden mobilterminaler er batteridrevne enheter, vil en optimal CP-lengde muliggjøre disse enheter til å sende datastrømmer på en pålitelig måte og lavest mulig strømforbruk. Batteri levetid forlengelse er viktig, spesielt i mobilenheters sammenheng. På sett og vis kan en

skalbar CP-lengde anbefales for en mulig løsning. Etter min mening kan dette implementeres ved å hyppig oppdatere utbredelse av kanalens spredtforsinkelse i et system.

6.3. Delbærere og datakapasitet

LTE benytter til sammen 1201 delbærere som krever en effektiv båndbredde på $1201 \times 15 \text{ kHz} = 18.015 \text{ MHz}$ for 20 MHz profilen. Dette resulterer i 1.985 MHz av sikkerhetsbånd til sammen. Mobile WiMAX strekker seg over 1681 delbærere når båndbredden på 20 MHz er benyttet. Dette gir en effektiv båndbredde på $1681 \times 10.9375 \text{ kHz} = 18.39 \text{ MHz}$ og et sikkerhetsbånd på 1.614 MHz. Analysen i en hele båndbredde baserte på delbærere viser at LTE er 371 kHz (1.9%) mer båndbredde effektivt enn WiMAX. For WiMAX er delbærere en funksjon av båndbredde, oversamplingsraten, og FFT størrelse (eks. $\Delta f = 10 * (28/25) / 1024 = 10.9375 \text{ kHz}$), mens for LTE er Δf en funksjon av den generelle tidsenheten i system ($T_S = 32552 \mu\text{s}$), og den maksimale FFT størrelse, dvs. ($\Delta f = 1/(T_S * 2048) = 1/(32552 \mu\text{s} * 2048) = 15 \text{ kHz}$). Pga Doppler anbefales det å benytte en tilstrekkelig Δf for høy hastighetsenheter.

6.4. Syklisk Prefiks versus data (nyttelast)

En av de viktigste parameterne for gruppering eller datapakker utforming er den Sykliske Prefiks-lengden (CP). Hvis den ikke er lang nok vil neppe motvirke fenomener som oppstår på grunn av spredningsforsinkelse (f.eks. forsinkelse pga flerveis utbredelse). Hvis den er for lang vil den redusere datakapasitet. Derfor må en systemdesigner foreta et viss kompromiss.

I LTE er to CP-alternativer definert: Normal- og Utvidede-CP, med $T_{CP} = (4.69 \text{ og } 16.7)$ mikrosekunder henholdsvis. Den nyttige symbolperioden T_u er på $66.7 \mu\text{s}$, og den gir 7% Normal CP-lengde og 20% Utvidede CP-lengde i forhold til T_u . LTE's OFDM-symbollengden er på $71.4 \mu\text{s}$ og $83.4 \mu\text{s}$ for Normal- og Utvidede-CP henholdsvis. På den andre siden, har Mobile WiMAX et sett av 4 ulike CP-lengder som er definert ved produktet mellom forholds faktor (G) og den nyttige symbolperioden (se tabell 4.5-11). I tabellen er en CP på $(1/8 * 91.429 \mu\text{s})$ benyttet over 5, 10, og 20 MHz kanalbåndbredder. Dette bidrar med ekstrainformasjon mellom tre og 22% avhengig av forholds faktor G. Den totale WiMAX OFDM-symbolperioden for $G = 1/8$ (12%) er på $102.857 \mu\text{s}$.

Det er allerede referert over at CP-lengden varierer per symbolsbasis, og dette fører til datarate tap. Reduksjonen av båndbredde effektivitet kan uttrykkes mellom CP-lengde ($T_{CP} = GT_S$), og den nyttige OFDM-symbolperioden, $T_u = NT_S$, der T_S er samplingsperiode og N er FFT-punktprøver eller overført informasjon):

$$\beta_{overhead} = \frac{T_{CP}}{T_u + T_{CP}} \quad (\text{se [18], s.129})$$

En grov CP-baserte analyse viser at Mobile WiMAX er mindre båndbredde-effektivt enn 3GPP LTE. Mine simulasjoner baserte på Mobile WiMAX gir en β rundt 10% for $G=1/8$.

Sammenlignet med WiMAX, har LTE mindre behov for overheaders. Men dette garanterer på ingen måte en absolutt overlegenhet. For et LTE system som skal operere i et scenario med lang kanalens spredtforsinkelse (rundt 3700 ns), vil den korte CP-lengden ($5.21 \mu\text{s}$) fungere på grensesone. Da er risiko for ISI veldig stor. En mulig løsning er å benytte en kontinuerlig lokalisering av timing-offset i både CP korrelasjon og bruk av referanse signaler (RS) [18].

6.5. OFDMA versus SC-FDMA

Det er referert på delkapittel 4.5 at nedlink benytter OFDMA-baserte aksessmetode for både Mobile WiMAX og LTE. OFDMA er en OFDM utvidelse for å implementere flerbruker kommunikasjonssystem. I OFDM er det bare en enkelbruker som benytter seg av alle delbærere for å sende eller motta data i et bestemt tidspunkt (f.eks. WiMAX fastnett).

I OFDMA er delbærere fordelt til ulike brukere samtidig, slik at flere brukere kan organiseres på en dynamisk måte til å motta eller sende data samtidig. Data symboler benytter direkte modulasjonsskjema for å modulere hver enkelt delbærere, (slik at amplituden for hver delbærere i et tidspunkt er gitt av konstellasjonspunkter i det aktuelle digitale modulasjonsskjemaet).

Slik som OFDM(A) deler SC-FDMA den sendingsbåndbredden i multippel parallelle delbærere. Disse delbærere holdes ortogonalt til hverandre i en frekvensselektiv kanal ved hjelp av Syklisk Prefiks. I likhet med OFDM(A) benytter SC-FDMA Syklisk Prefiks for å hindre ISI mellom SC-FDMA-informasjonsblokker. På den andre siden er SC-FDMA signal modulert på forskjellig måte. Dette modulerte signalet i én delbærere er gitt av den lineære kombinasjonen av alle datasymboler overført i det samme tidspunktet. I løpet av en symbolperiode bærer alle overførte delbærere en komponent (en del) av hvert modulert SC-FDMA datasymbol. Dette produserer den virtuelle enkeltbærer-FDMA strukturen.

Jo mindre er delbærere for hvert sett av overført datasymboler jo mindre blir sendereffekt. SC-FDMA gir på denne måten en lavere PAPR enn OFDM(A). Dette gjør den SC-FDMA-baserte opplinksoverføringen mer attraktiv særlig for brukerutstyr med redusert senderytelse. Videre kan kanalens frekvensselektiv fading bekjempes mer effektivt. For data symbolperioden spredt i alle tilgjengelige sendingsdelbærere er det mindre sannsynlig at alle sendingsdelbærere opplever dyp fading samtidig. Derfor kan data symboler fortsatt rekonstrueres fra andre delbærere som opplever bedre kanalforhold. Derimot har DFT despredning en bivirkning på mottakers side (når benyttet). Siden alle SC-FDMA data symbolkomponenter er spredt over alle delbærere og så gjør støysignal det samme kan dette generere et fenomen kalt støy-utvidelse (eng. noise enhancement). Støy-utvidelsen nedsetter SC-FDM ytelse slik at en kompleks MMSE (Minimum Mean Square Error) baserte utjevner er nødvendig på mottakers side.

LTE vil garantert dra fordele ved SC-FDMA implementering på opplink. Dette kan på en måte definere markedsføring av LTE-baserte enheter i fremtid. WiMAX må da betrakte dette som en utfordring, slik at de kan holde fast ved konkurranse.

7. Konklusjon

I dette arbeidet er en dyp sammenligning av 3GPP LTE og WiMAX blitt presentert med fokus på radiogrensesnittets ytelse. Selv om begge teknologiene gir omfattende og avanserte funksjonsinnhold, skaper forskjellen i design av radiogrensesnitt typiske effekter som er grundig vurdert og forklart i denne rapporten. Likevel er den generelle radioytelsen ganske lik, med LTE noe fordelaktig framfor WiMAX på grunn av lavere ekstra plassbehov.

Nedlink aksessmetoden (f.eks. fra BS til MS) for LTE og WiMAX er OFDMA, mens for opplink er SC-FDMA og OFDMA henholdsvis. LTE opplink utmerker seg over WiMAX opplink ved å utnytte SC-FDMA hvilket gir en løsning på PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) som oppleves ved WiMAX OFDMA opplink. Årsaken til dette er at i tidsdomenet er et multibærersignal summen av mange smalbandssignaler. Noen ganger er det resulterende signalet lite, andre ganger er det stort. Det vil si at toppverdien av signalet er vesentlig større enn gjennomsnittsverdien. PAPR er egentlig en av de viktigste utfordringene som OFDM møter på opplinkretning i WiMAX, fordi dette reduserer effektiviteten og dermed øker kostnaden av RF forsterkerer, som er en av dyreste komponentene i et radiomiljø. På grunn av dette ønsker WiMAX å gjøre noe med det, slik at de kan holde fast ved de konkurrerende teknologiene.

Det er også bevist at bitraten i LTE er noe høyere enn i WiMAX. Årsaken er at kanalbandbredden, moduleringsmetoden og det fysiske lagets design har en viktig innflytelse på datahastighet. Disse to parameterne i tillegg til måten PHY er organisert på er diskutert i kapitlene over. Dessuten er datahastigheten også bestemt av sikkerhetstida (eng. Guard time), ekstra informasjonsband (overhead), og ned/opp forholdet i TDD-tilfellet. Sikkerhetstida er ment å overvinne flerbane-effekter. Ekstra informasjonsband er definert som prosentdel av tid der ingen nyttig data blir sendt over kanalen, og den nytteløse tida brukes f.eks. for systeminitialisering og synkronisering. Et eksempel i avsnitt 4.5.2.3.1 viser at LTE er (1.9%) mer bandbredde effektivt enn WiMAX, og 5% mindre overhead enn WiMAX.

Dessuten er datahastigheten i LTE noe høyere enn dagens Mobile WiMAX generasjon. Mobile WiMAX støtter smartantenne teknologier som Beamforming (DL=2x1, UL=1x2), STC (2x1, matrix A f.eks. Alamouti), rom multipleksing (DL=2x2 Matrix B vertical encoding, UL=1x2 two user collaborative SM) (se [9] s.25). I teorien, når en 10 MHz WiMAX' profil og MIMO (2x2) benyttes, er maksimale datarater 63.4/28.2 [Mbps].

Det er også gjort simulasjoner for den sertifiseringsprofilen i 20 MHz bandbredde som er en del av WiMAX forslag for IMT-Advanced. Resultatene for maksimale DL/UL datarater er 64.8 Mbps/29.2 Mbps henholdsvis. Disse resultatene er oppnådd ved SISO sendemodus, hvis en 2x2 MIMO er benyttet, så vil verdiene fordobles til (130 Mbps og 58.4 Mbps henholdsvis). På den andre siden, er LTE's maksimale DL/UL datarater på 86.4 Mbps og 55.5 Mbps henholdsvis. Disse verdiene er estimert ved SISO sendemodus (se kapittel 4). LTE støtter imidlertid en MIMO 4x2 oppsetting, og dette vil øke datarater enda mer.

Ytelsen og egenskapene til begge teknologiene vil bare bli bedre og bedre over tid, og vil representere en direkte konkurransedyktig trussel mot eksisterende faste bredbandstilbud. Det er et ambisiøst mål, og bortsett fra nettverksteknologien, vil ting som backhaul kapasitet, og tilgjengelighet av nettverksenheter avgjøre hvordan den trådløse verdenen blir.

Fra et markeds perspektiv, har WiMAX utmerket seg mer enn LTE på grunn av sin tidligere implementering. WiMAX kom først ut i 2007/08, og flere nettverker skal være tilgjengelige senere i år. LTE derimot er ennå ikke rullet ut, selv om noen eksperimentelle nettverker er i gang, er den effektive implementeringen forventet i 2010/12.

8 Referanser

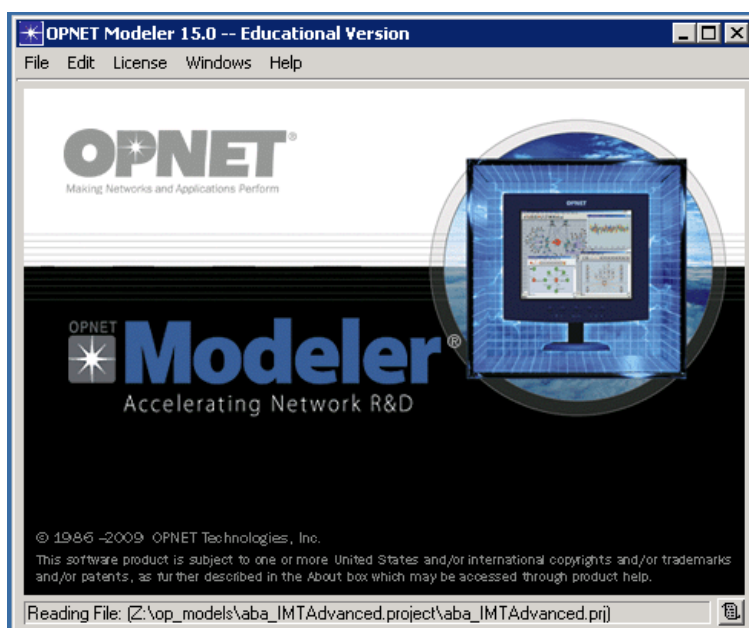
- [1] Report ITU-R M.2135-2008, Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced, http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2135-2008-PDF-E.pdf
- [2] Report IUT-R M.2134-2008, Requirements related to technical performance for ITM-Advanced radio interface, http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2134-2008-PDF-E.pdf
- [3] Report ITU-R M.2133-2008, Requirements, evaluation criteria and submission templates for the development of IMT-Advanced.
- [4] Jeffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh, Rias Muhamed; Fundamentals of WiMAX; Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series-2007.
- [5] [ETSI] : <http://www.etsi.org/WebSite/Technologies/utran.aspx>
- [6] IEEE 802.16-2004, IEEE Std 802.16TM – 2004 (Revision of IEEE Std 802.16-2001), IEEE Std for Local and Metropolitan Area Networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems.
- [7] IEEE 802.16e-2005, IEEE Standard for LAN/MAN, Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems. Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands.
- [8] IEEE 802.16TM – 2009 (Revision of IEEE Std 802.16-2004), IEEE Std for LAN/MAN, Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems.
- [9] WiMAX Forum: Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation, August 2006.
- [10] [Draft] for IEEE 802.16m-07/002r8, System Requirements Document-15.01.2009. IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group.
- [11] [Draft] for IEEE 802.16m-08/003r9a, System Description Document-31.05.2009. IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group.
- [12] WiMAX Forum: Mobile System Profile Specification: Release 1.5 Common Part (Revision 0.2.1: 2009-02-02)
- [13] White Paper: Jim Zyren, Dr. Wes McCoy; Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer. Doc.No. 3GPPEVOLUTIONWP, Rev 0, 07/2007. “Freescale semiconductor”.
- [14] ITU: <http://www.itu.int/osg/spu/imt-2000/technology.html#Introduction> – Evolution
- [15] ETSI TS 136.201, v8.3.0 (2009-04) – Technical Specification. LTE; E-UTRA; LTE Physical Layer; General description (3GPP TS 36.201 version 8.3.0 Release 8)

- [16] ETSI TS 136.211, v8.7.0 (2009-06) – Technical Specification. LTE; E-UTRA; Physical Channels and modulation; (3GPP TS 36.211 version 8.7.0 Release 8)
- [17] ETSI TS 136.101, v8.6.0 (2009-07)–Technical Specification. LTE; E-UTRA; User Equipment radio transmission and reception; (3GPP TS 36.101 v8.6.0 Release 8)
- [18] Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Baker: LTE, The UMTS Long Term Evolution, From Theory to Practice, Wiley – 2009
- [19] ETSI TS 136.212, v8.7.0 (2009-06) – Technical Specification. LTE; E-UTRA; Multiplexing and Channel coding; (3GPP TS 36.212 version 8.7.0 Release 8)
- [20] 3G Americas February 2009, The Mobile Broadband Evolution: 3GPP Release 8 and Beyond HSPA+, SAE/LTE and LTE-Advanced.
- [21] WiMAX Forum: Requirements and Recommendations for Release 1.x, Air Interface 8(version 1.8) – 07/17/2008. “080717_Rel1.x Mobility Profiles”.
- [22] ETSI TS 136.104, v8.6.0 (2009-07) – Technical Specification. LTE; E-UTRA; Base Station (BS) radio transmission and reception; (3GPP TS 36.104 v8.6.0 Release 8)
- [23] WiMAX Forum: WiMAX System Evaluation Methodology, version 2.1 – July 7, 2008
- [24] <http://en.wikipedia.org/wiki/SC-FDMA>
- [25] Mobile WiMAX Group: “Mobile WiMAX link budget”: <http://www.scribd.com/doc/12867873/mobile-WiMAX-link-budget>
- [26] ETSI TS 125.913, v8.7.0 (2009-06) – Technical Specification. LTE; E-UTRA(N); Requirements for E-UTRA; (3GPP TS 25.913 version 8.0.0 Release 8)
- [27] ITU-R Recommendation M.1225, “Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000”, 1997.
- [28] Simon R. Saunders, Alejandro Aragón-Zavala: “Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems”, Wiley 2007.
- [29] ETSI TS 136.213, v8.7.0 (2009-06) – Technical Specification. LTE; E-UTRA; Physical Layer Procedures; (3GPP TS 36.213 version 8.7.0 Release 8).
- [30] ETSI TS 136.101, v8.6.0 (2009-07) – Technical Specification. LTE; E-UTRA; User Equipment Radio Transmission and Reception; (3GPP TS 36.101 version 8.6.0 Release 8).
- [31] John R. Barry, Edward A. Lee, David G. Messerschmitt: “Digital Communication”, Springer 2004.
- [32] http://etd.lsu.edu/docs/available/etd-04042006-144949/unrestricted/Wu_dis.pdf

- [33] [QUALCOMM]: <http://www.qualcomm.com/>
- [34] [ITU-R]: <http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=information&mlink=imt-advanced&lang=en>
- [35] <http://www.j-sim.org/>
- [36] http://nslam.isi.edu/nslam/index.php/Main_Page
- [37] <http://www.omnetpp.org/>
- [38] <http://www.opnet.com/>
- [39] http://en.wikipedia.org/wiki/Bell_Labs
- [40] http://en.wikipedia.org/wiki/Cellular_network
- [41] Pierre Lescuyer, Thierry Lucidarme, "Evolved Packet System – The LTE and SAE Evolution of 3G UMTS", John Wiley & Sons Ltd 2008.
- [42] Mobil kommunikasjon UNIK4230 – Forelesningsbolk av Magne Pettersen – Teleplan og UNIK, 2009.
- [43] Antenner og radiobølgeutbredelse UNIK4150 – Forelesningsbolk av Michael Chafena – UNIK, 2009.

Vedlegg A: Opnet brukerveiledning

Denne veiledningen er en direkt oversettelse av "Opnet Modeler tutorial – Intro". En får tilgang for denne veiledningen innenfor Opnet Modeler API (figur A-1). Merk at alle figurer i dette vedlegget refereres til *OPNET Modeller tutorial* som finnes under *Help* (figur A-1).



Denne veiledningen lærer deg det meste grunnleggende om bruk av OPNET Modeler. Hvis du er ny om OPNET Modeler, vil denne korte innføringen hjelpe deg i gang. Hvis du utfører denne innføringen for første gang, les gjerne de følgende sidene for å komme i gang ved hjelp av denne innføringen sammen med OPNET Modeler.

Figur A-1: OPNET Modeler 15.0 – Student utgave [OPNET].

A.1. Om Modeller

Denne veiledningen ble skrevet basert på den opprinnelige programvaren og bibliotekersmodell utgave for OPNET Modeler 12.0.A, men gjelder også for 15.0.A med små forskjellene. Uansett, hvis du bruker en annen versjon kan du få forskjellige resultater eller ikke får fullført noen leksjoner. For å fullføre veiledning må du ha OPNET Modeler for standard modeller installert. Disse modellene er installert når du først installerer den standardmodelle biblioteken. OPNET Modeler for standardmodeller dekker vanlige protokoller og leverandørers enheter. Standardmodeller ligger vanligvis i forhåndsgitte underkataloger, (< release >): < release > \ **models** \ **STD** \ < protocol_name > .

< release > : Beskriver katalogen som inneholder aktuell OPNET Modeler programvare. Du finner < release > ved å utføre følgende:

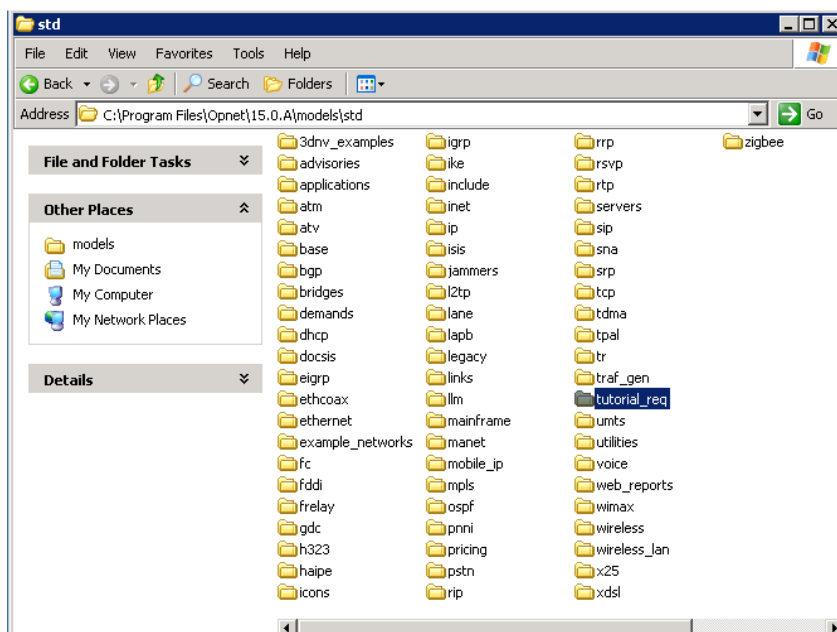
- 1- Velg *Help* → *About This Application* i hovedmenyen.
- 2- I *About OPNET Modeler* dialogboksen, klikker du på *Environment* kategorien, og deretter utvide *System Information* delen.
- 3- Under *System Information*, finn *release* katalogen.

F.eks. < release > for en standard installasjon av utgave 15.0 A på Windows er:

C: \ Program Files \ < install_dir > \ < release > .

A.2. Åpning av veiledningsfiler

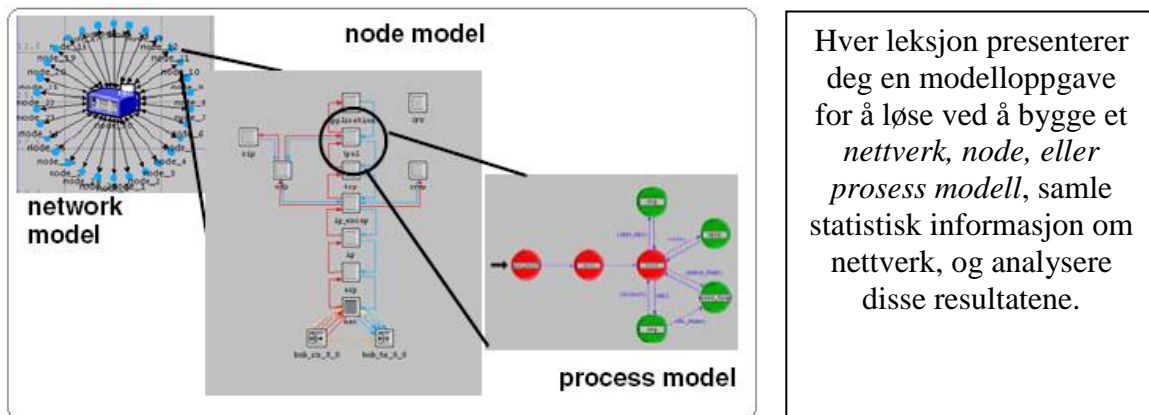
Flere veiledningsfiler vil henvide deg til å åpne modell-filer og lagre dem med et unikt prefiks, f.eks. initialene (< your_initials >). På denne måten kan flere brukere opprette og fullføre sine egne arbeidskopiene av den samme veiledningen. Når du utfører en veiledning, blir du bedt om å åpne spesielle veilednings modell-filer. Disse modell-filene er nødvendige for å fullføre veiledningen, de er lokalisert i katalog eller undermapper: < release > \ **models** \ **STD** \ **tutorial_req**. Når du blir bedt om å åpne modell-filer som ikke har prefikser med dine initialer, må du navigere til *tutorial_req* katalogen.



Når du lagrer en ny modell-fil, eller bruk *lagre som...* kommandoen til å lagre en eksisterende modell-fil med dine initialer, husk å navigere til arbeidskatalogen (normalt < home > \ op_models) for å lagre filer.

Figur A-2: Navigasjon til tutorial_req katalogen.

A.3. OPNET Modeler funksjoner og editorer

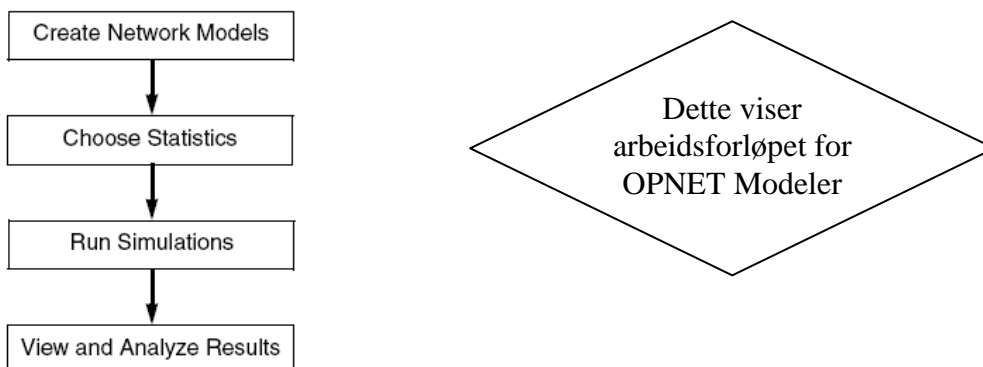


Figur A-3: Nettverk, node, og prosess modeller. Hver leksjon hjelper deg å bli kjent med OPNET modellering og viser omfanget av problemer OPNET Modeler kan løse.

A.3.1. OPNET Modeler arbeidsforløp:

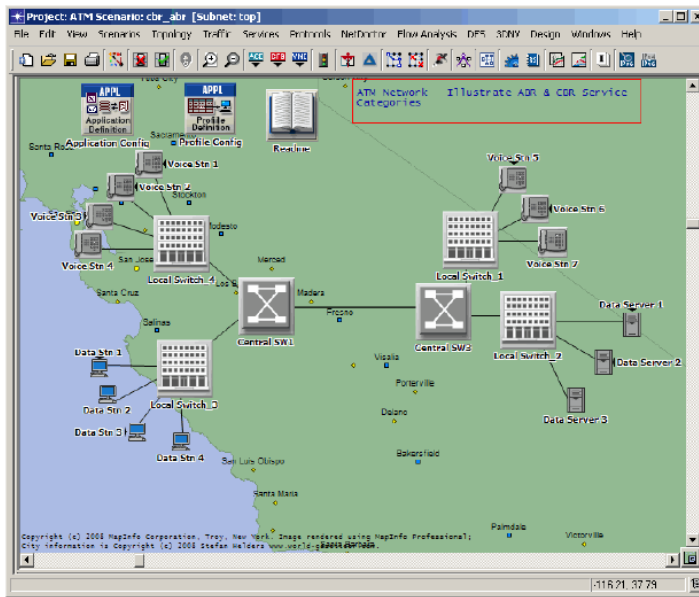
Figuren nedenfor illustrerer OPNET Modeler arbeidsforløp, arbeidsområdet, og editors. Bli kjent med disse viktige funksjonene, og deretter starte veiledningsleksjonen.

Arbeidsforløpet for OPNET Modeler (det vil si trinn du bruker til å bygge et nettverk modell og kjøre simuleringer) sentrerer rundt prosjektets editor. I denne editoren kan du opprette en nettverksmodell, velge de ønskede statistikkene du vil samle inn fra hvert nettverk objekt eller fra hele nettverket, utføre en simulering, og vis resultater.



Figur A-4: Arbeidsforløp for OPNET Modeler.

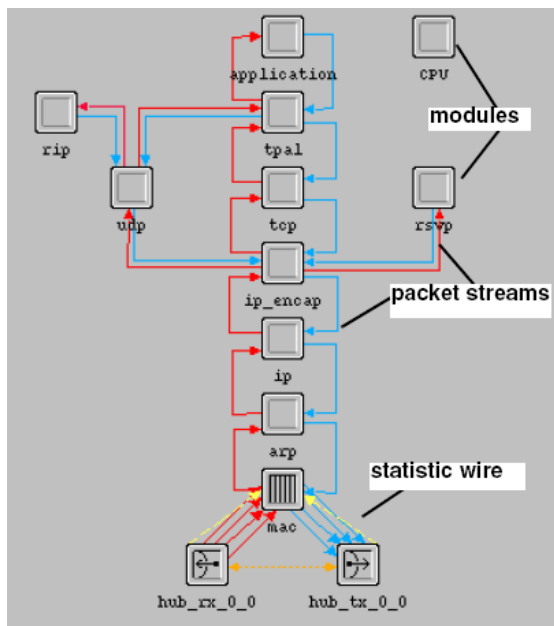
A.3.2. Projektet Editor



Projektet Editor er det viktigste utgangspunktet for å bygge et nettverk simulering. Fra denne editoren kan du bygge en nettverksmodell med modeller fra standard-biblioteket, velge statistikker om nettverket, kjøre en simulering, og vise resultatene, se figur A-5. Du kan også opprette node og prosessmodeller, bygge pakkeformater, og lage filtre og parametere, ved å benytte spesialiserte editorer som du kan få tilgang fra Projekt Editor.

Figur A-5: En nettverksmodell i Projekt Editoren.

A.3.3. Node Editor

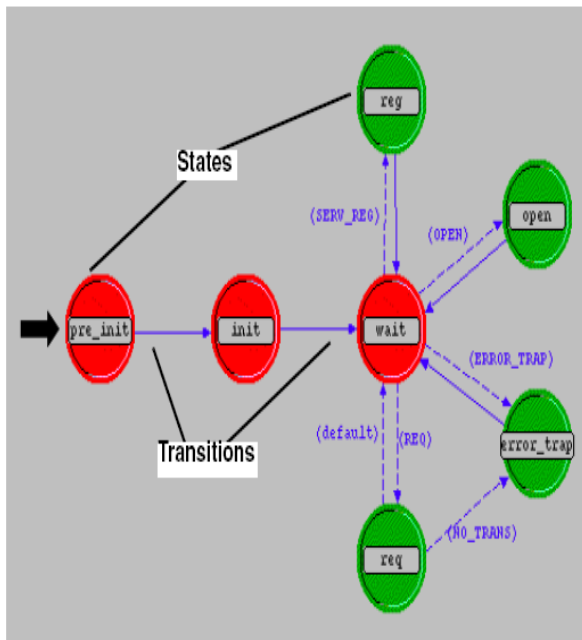


Node Editor

lar deg definere opptreden til hvert nettverk objekt. Opptreden er definert ved hjelp av ulike moduler, som hver modellerer noen interne aspekter av node oppførselen som f.eks. data kreasjon, datalagring, osv. Moduler er tilkoblet via pakket strømmer eller statistikk ledninger. Et nettverk objekt er vanligvis laget opp av flere moduler som definerer sin opptrede.

Figur A-6: Node Modell

A.3.4. Prosess Modell Editor

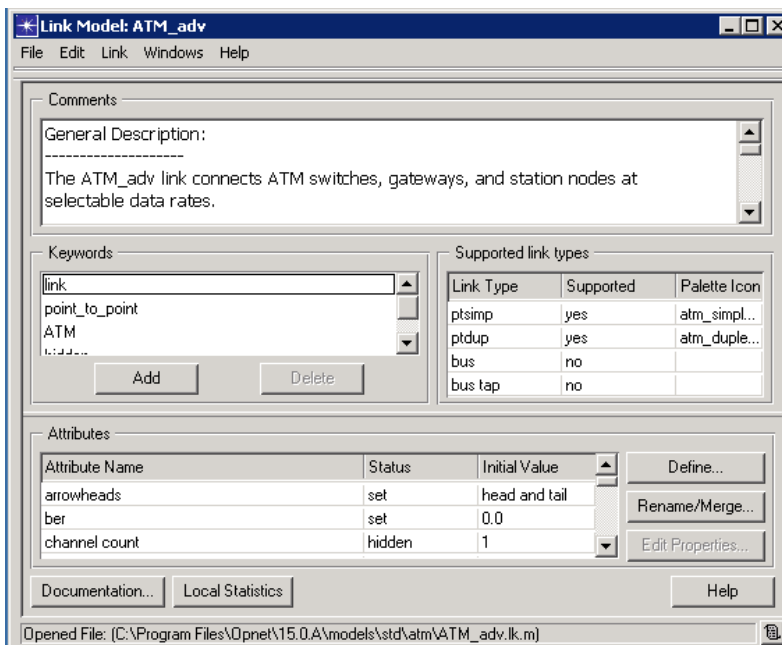


Prosess Modell Editor

lar deg lage prosessmodeller, som styrer den underliggende funksjonaliteten til node modeller opprettet i Node Editor. Prosessmodeller representeres av endelige tilstandsmaskiner (FSMs), og er opprettet med ikoner som representerer statene og linjer som viser overganger mellom stater. Operasjoner utførte i hver stat for en overgang er beskrevet i hver stat eller for en overgang er beskrevet i integrert eller innebygget C eller C++ kode blokker.

Figur A-7: Prosess Modell Editor (PME).

A.3.5. Link Modell Editor

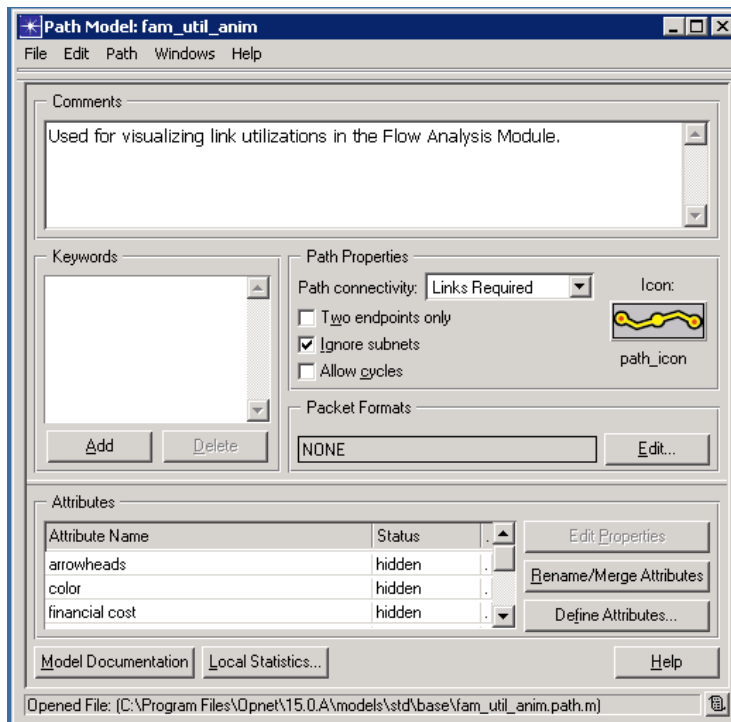


Link model Editor

lar deg lage nye typer av link objekter. Hver ny koblingstype kan ha ulike grensesnitts egenskaper og representasjon. Søkord kan også spesifiseres for enkel gjenkjenning.

Figur A-8: Link Modell Editor.

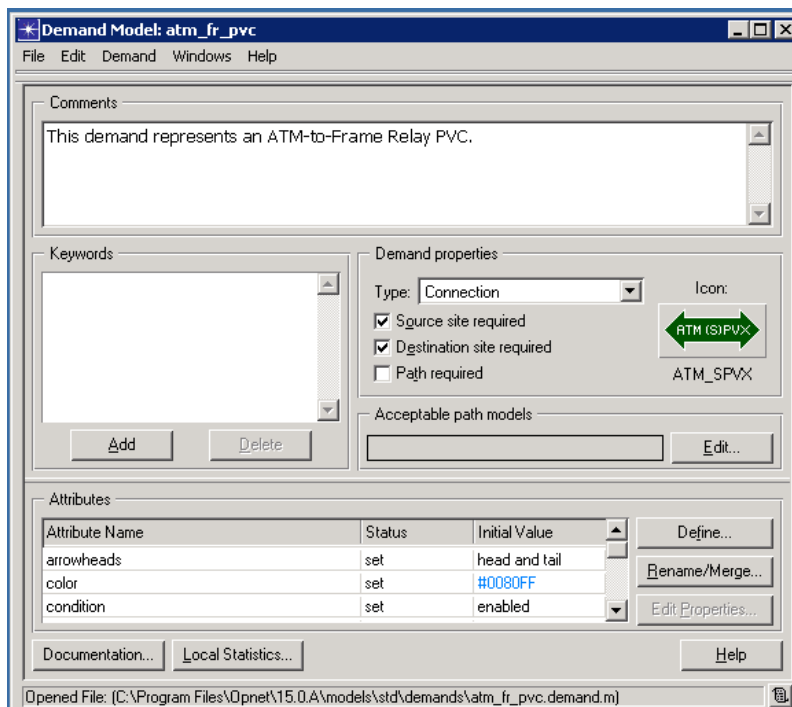
A.3.6. Bane Editor



Bruk *Path Editor* til å lage nye baneobjekter som definerer en trafikk rute. Eventuelle protokoll modell som bruker logiske forbindelser eller virtuelle kretser (MPLS, ATM, Frame Relay, osv.) kan bruke baner for rute trafikken.

Figur A-9: Bane Editor.

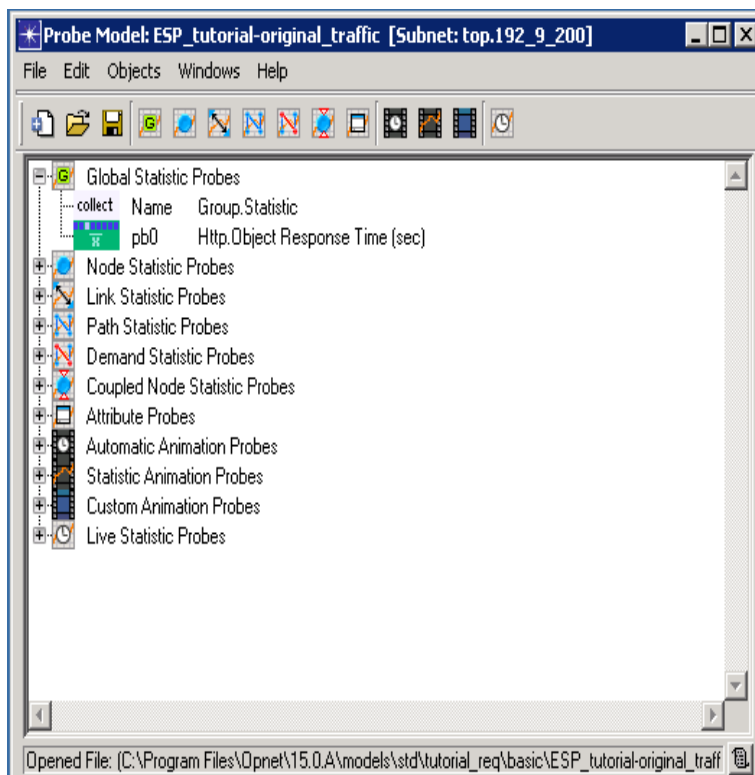
A.3.7. Etterspørselen Editor



Editoren lar deg definere etterspørsel modeller; hvert etterspørsel objekt underliggende modell vil avgjøre sine grensesnitts egenskaper, presentasjon, og hvordan objektet oppfører seg. Du oppretter eller endrer spesifikasjoner for etterspørsel modellen i ”*Demand Editor*” dialogboksen.

Figur A-10: Demand Editor.

A.3.8. Måleverdigiver Editor



Måleverdigiver editoren (eng. Probe Editore) lar deg angi statistikker som skal samles under simulering. Mens du kan gjøre dette på *Project Editor*, kan du også angi tilleggs egenskaper av hver måleverdigiver med *Probe Editor*. Det finnes flere forskjellige typer statistikker som kan samles inn ved hjelp av ulike måleverdigiver: globale statistikker, link statistikker, node statistikker, attributt statistikker, og flere typer av animasjon statistikker.

Figur A-11: Probe Editor.

A.3.9. Simulering Sekvens Editor

Selv om du kan kjøre simuleringer innenfra Prosjekt Editor, kan det være lurt å angi flere simuleringbegrensninger i *Simulation Sequence Editor*. Simuleringssekvensene er representert ved simuleringssikoner, som inneholder et sett med attributter som styrer gjennomløpstids egenskaper av simulasjon.

A.3.10. Antenne mønster Editor (med trådløs funksjonalitet)

I OPNET Modeler / Wireless lar deg antenne mønster editor til å modellere retningen – avhengige forsterkningsfaktor (gain) egenskaper av antenner. OPNET Modeler kan bruke disse ~faktorsmønstrene for å bestemme ~faktorsverdier, gitt at relative posisjoner av noder er kjent.

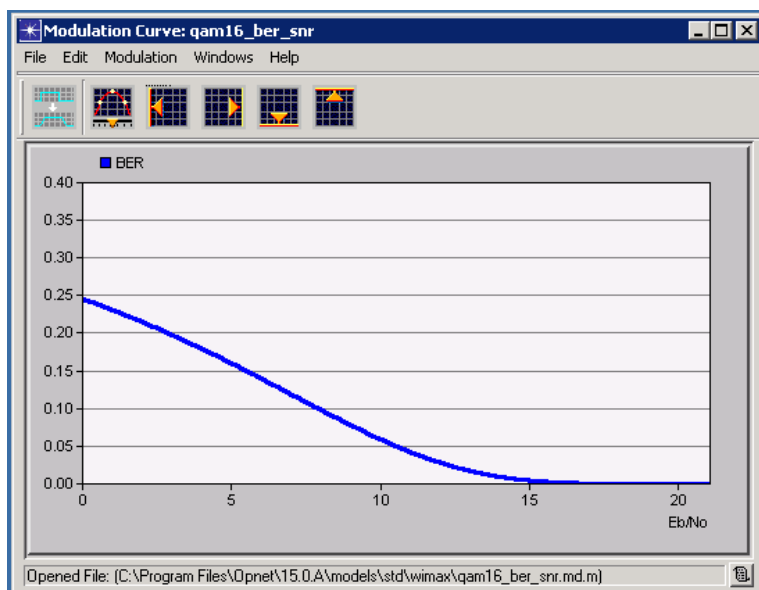
A.3.11. Filter Editor

Selv OPNET Modeler leveres med innebygd data filtre. *Filter Editor* tillater deg å opprette flere filtre. Du kan bygge nye filter modeller ved å kombinere eksisterende modeller med hverandre.

A.3.12. ICI (Interface Control Information) Editor

Editoren lar deg definere den interne strukturen av ICI-er. Grensesnittet benyttes til å formalisere programavbrudd-basert interprosess kommunikasjon.

A.3.13. Modulasjonskurve Editor (med trådløs funksjonalitet)



OPNET Modeler/Wireless, vil modulasjonskurve editoren tillate deg opprette modulleringsfunksjoner til å karakterisere sårbarheten til en informasjonskoding og modulerings skjema versus støy. Disse modulleringsfunksjonene plottes bit-feilrate (BER) av et informasjonssignal i funksjon av det effektive signal-til-støy-forholdet (Eb/No).

Figur A-12: Modulasjonskurve Editor.

A.3.14. Pakkeformat Editor

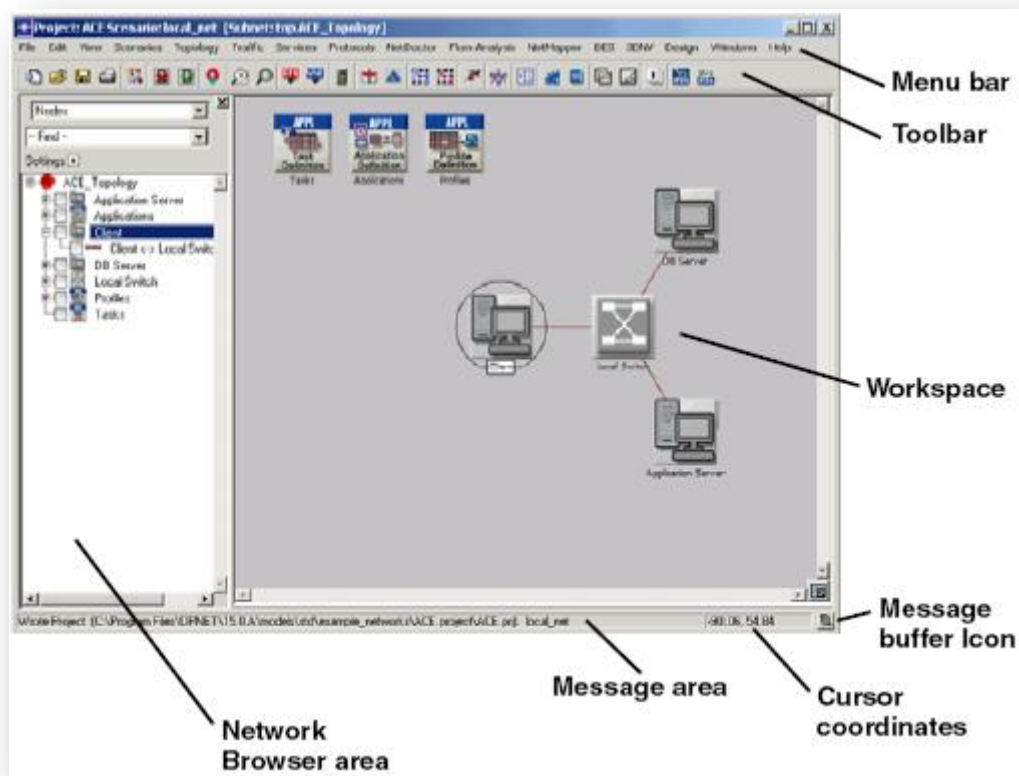
Pakkeformat Editoren lar deg definere den interne strukturen i en pakke som et sett av felter. En pakkeformat inneholder ett eller flere felter, representert i editoren som fargede rektangulære bokser. Størrelse på boksen er proporsjonal med antall bits angitt som feltets størrelse.

A.3.15. PDF Editor

PDF (Probability Density Function) Editoren lar deg beskrive spredning av sannsynlighet over en rekke mulige utfaller. En PDF kan modellere "likelihoods" knyttet til pakke inter-ankomst tidspunkter, eller kan modellere sannsynligheten for overføringsfeil.

A.3.16. Prosjekt-vindu Editor

Det er flere områder i Prosjekt-vinduet som er viktige for å bygge og gjennomføring av en modell. Når du åpner et eksisterende prosjekt, bør skjermen ligne som på figur A-13.



Figur A-13: Prosjekt- vindu Editor.

Følgende beskriver hvert område på prosjekt editoren:

Menylinje:

Menylinjen er plassert øverst i redigeringsvinduet. Den organiserer alle de ikke-kontekstsensitive redigeringsoperasjoner i et sett av lokale menyer. Den eksakte sett av menyene og meny operasjoner tilgjengelige endres i henhold til produktet moduler som er aktivert. Kontekstsensitive editor operasjoner er tilgjengelige ved å høyreklikke på et objekt eller på bakgrunn av arbeidsområde.

Verktøy knapper:

Flere av de mest valgte menylinjene kan aktiveres via knapper i verktøylinjen. Figuren nedenfor viser verktøyknapper som er tilgjengelige i Prosjekt Editor. Merk at avhengig dine spesifikke produkt og moduler, vil du se kun noen av disse knappene. Når du holder musepekeren over en knapp, vises et verktøytips som identifiserer selv knappen.

Arbeidsområde:

Den sentrale, rullbar region av redigeringsvinduet er det som kalles arbeidsområdet. Det er her nettverk modellen vises; du kan velge og dra nettverksobjekter i arbeidsområdet, og velge kontekst-sensitive meny operasjoner ved å høyreklikke på bakgrunnen.

Nettverk Søkerutine:

Nettverk søkerutine (eng. Browser) organiserer og viser nettverk objekter i form av en trevisning (eng. Treeview). Trevisningen gjør det lett å finne og redigere objekter, spesielt i store nettverker med flere lager av delnett. Endringer av objekter i nettverkssøkerutine gjenspeiles i nettverkstopologien som vises i arbeidsområdet. Nettverkssøkerutine kan dras eller fjernes i arbeidsområdet ved å velge ”View” i menylinjen.

Meldingsområde:

Meldingsområdet ligger ved bunnen av redigeringsvinduet. Den gir informasjon om status av verktøyet. Du kan klikke på ikonet (til høyrehjørnet) ved siden av meldingsområdet for å åpne meldingsbuffer vinduet. Meldingsbuffer vinduet viser en liste over meldinger som har dukket opp i meldingsområdet. Du kan åpne meldingsbuffer vinduet om en del av meldingslinje er avkortet i meldingsområdet eller hvis du mener en kommende melding har erstattet en viktig varslings eller melding.

Verktøytips:

Hvis du holder markøren over en verktøy-knapp eller et nettverksobjekt i arbeidsområdet, vil en ballonghjelp vises. Verktøytippet beskriver en av flg:

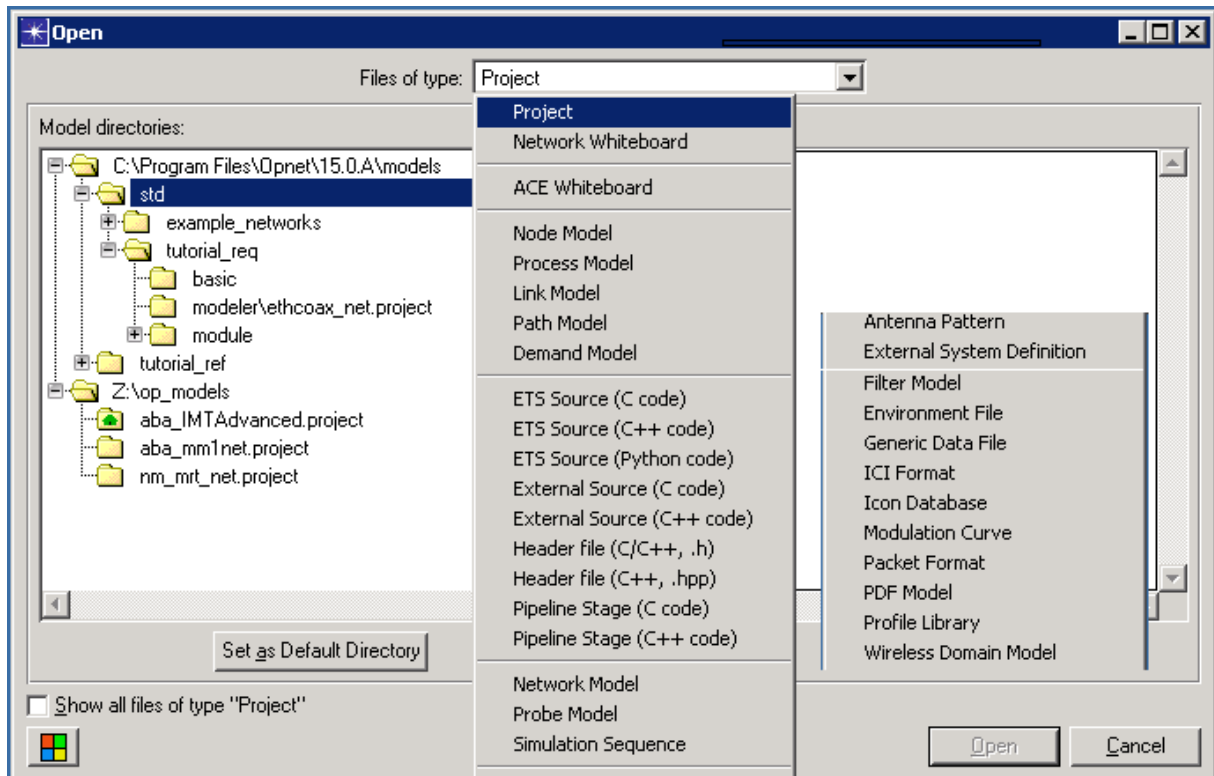
- Handlingen som oppstår hvis knappen trykkes.
- Informasjon om nettverksobjektet

A.3.17. Dokumentasjon:

Av og til kan det hende at du har spørsmål om visse aspekter ved veiledningen, verktøyet, eller modeller. Du kan referere til disse kildene:

- ✚ Innebygd dokumentasjon er tilgjengelig over verktøyet. F.eks. du kan få modell beskrivelser, attributt definisjoner og statistikk beskrivelser ved å velge et element og klikke på Detaljer-knappen. Noen dialogbokser har også *Hjelpknapper* som bringer opp tilleggs beskrivende informasjon.
- ✚ Produkt Dokumentasjon. Velg: *Help > Product Documentation*.
- ✚ FAQ (Frequently Asked Questions). Peker din nettleser for www.opnet.com/support. Du trenger brukernavn og passord for å få tilgang til Internett-basert FAQ. OPNET teknisk støtte sender normalt ditt brukernavn og passord ved e-post når du registrerer OPNET programvare for kjøpe eller evaluering.
- ✚ Siste oppdateringer til veiledningsleksjoner og modeller kan lastes ned fra nettside: www.opnet.com/support.
- ✚ Modell brukerveiledninger gir deg den seneste informasjonen om protokollmodeller og hvordan bruke dem. Disse brukerveiledninger vises vanligvis under en overskrift som ”Model Library” eller ”Standard Models” i den elektroniske dokumentasjonen. I noen løsninger, kan du også velge: *Protocols > [protocol name] > Model User Guide* i prosjekt-vindu redigeringen.

A.3.18. Generell oversikt over alle editorer



Figur A-14: OPNET Modeler har i alt er 33 funksjoner og editorer typer.

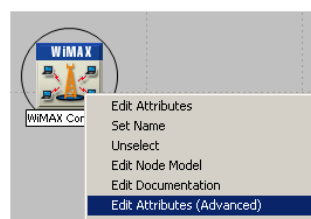
A.4 OPNET Scenario oppsetting

Opnet scenario kan bygges opp av flere noder som varierer i antall etter simuleringsformål. For at noder skal fungere i et oppbygd nettverk må alle noder henge sammen. Dette delkapittelet illustrerer basiske konfigurasjoner av følgende nodemodeller: WiMAX Configuration, Base Station, og Mobile Station, (se figur 5.4-1).

A.4.1. WiMAX Config

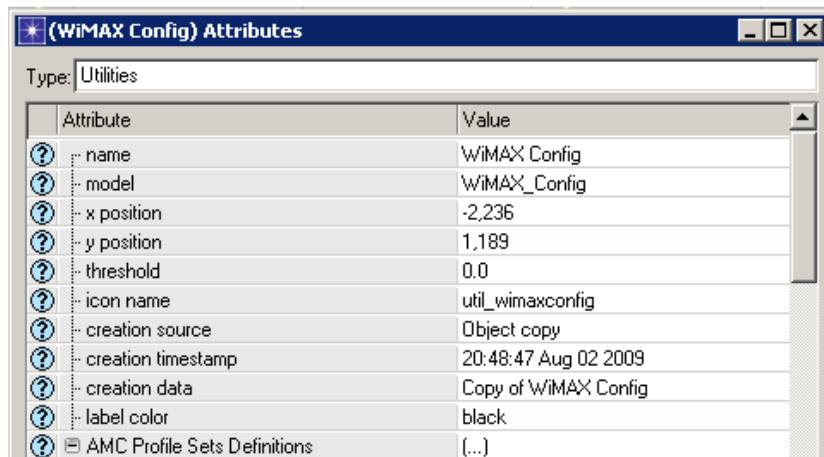
Objektet tilbyr en global konfigurasjon. Noden benyttes for å konfigurere parametere som tjenesteklasser (data, tallsignal, osv) og PHY profiler. Alle BS og MS tilknyttet i et sub-nettverk der noden befinner seg i skal referere seg til WiMAX Config oppsetting.

Høyre klikk over *WiMAX Config* objektet:

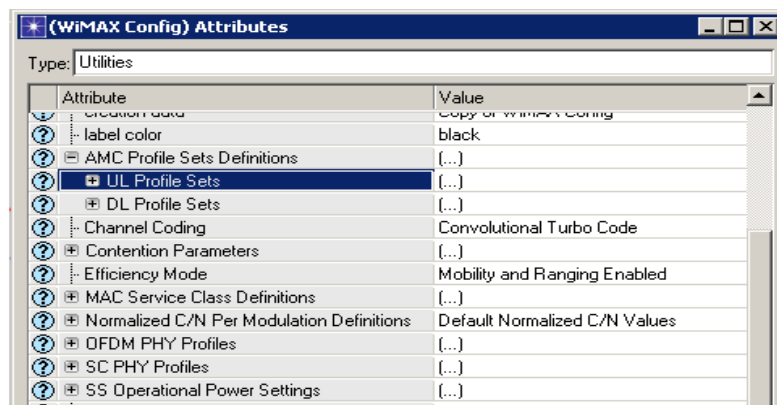


Figur A.4.1-1: Edit Attributes.

Velg Edit Attributes (Advanced):



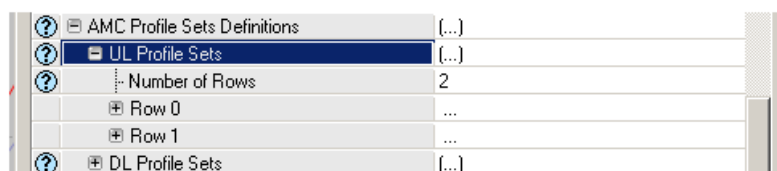
Figur A.4.1-2: WiMAX Config (Attributes). Figuren viser et snitt av den øvre delen hvor en kan gi blant annet navn på objektet, posisjonering i nettverk, osv.



Figur A.4.1-3: WiMAX Config (nedre delen). Figuren viser alle profiler som kan defineres i et nettverk: AMC, Kanal koding, MAC tjenester, OFDM PHY, osv.

Velg - AMC Profile Sets Definitions.

Attributten gir deg mulighet for sette opp nedlink og opplink adaptive modulasjons og koding. Denne funksjonen settes opp hvis den skal benyttes av BS eller MS i det tilsvarende nettverket.



Figur A.4.1-4: AMC Profil definisjon.

Attribute	Value
AMC Profile Sets Definitions	(...)
UL Profile Sets	(...)
Number of Rows	2
Row 0	
Name	Default UL Burst Profile Set
Profile Set Information	(...)
Row 1	
Name	UL Profile Set with Repetition Coding
Profile Set Information	Profile Set with Repetition Coding
DL Profile Sets	(...)
Number of Rows	2
Row 0	
Name	Default DL Burst Profile Set
Profile Set Information	Default DL Profile Set Information
Row 1	...

Figur A.4.1-5: Nedlink og opplink profiler for AMC definisjoner. Flere rader med ulike navner kan editeres, og en BS eller MS knytter seg til denne attributt i noden gjennom det oppgitte navnet.

Profile Set Information	(...)
Number of Rows	8
Row 0	...
Row 1	...
Row 2	
Mandatory Exit Threshold (dB)	22.5
Minimum Entry Threshold (dB)	23
Modulation and Coding	16-QAM 1/2
Row 3	...

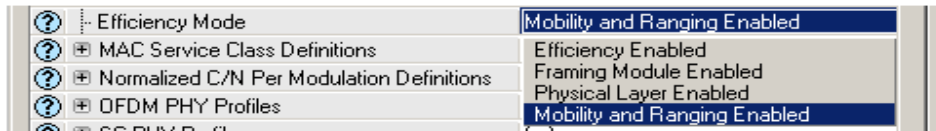
Figur A.4.1-6: AMC profil informasjon. To obligatoriske dB nivåer, modulasjon og koding, disse nivåene er vel definert i [7].

Contention Area	(...)
Initial Ranging Area	(...)
Number of Symbol Times	2
Number of Subchannels	6
Periodic Ranging/Bandwidth Request Area	(...)
Number of Symbol Times	1
Number of Subchannels	6
Fast Feedback Area	(...)
Number of Symbol Times	3
Number of Subchannels	1

Figur A.4.1-7: Område for parametere om aksess av type "konkurrans". Initial avstandsmålersområde benyttes for BS assosiasjon mens en SS eller MS er i bevegelse. Vanligvis er SS/MS assosiert til den nærmeste BS. Periodisk avstandsmåler eller BW etterspørsel område er konfigurert for en tidslukke av et symbol i tidsaksen og 6 delkanaler i frekvensaksen.

Channel Coding	Convolutional Turbo Code
Contention Parameters	Convolutional Code
Efficiency Mode	Convolutional Turbo Code

Figur A.4.1-8: Kanal koding. Opnet støtter to type koding, CC og CTC.



Figur A.4.1-9: Efficiency Mode. Det avhenger av formål for dine WiMAX simulasjonsstudier. Det er fire kategorier å velge imellom. ”Mobility and Ranging Enabled” er valgt i dette arbeidet, den aktiverer alle fysiske lags effekter, ramme modellering, ARQ funksjon, mobilitet og ranging.

	Service Class Name	Scheduling Type	Maximum Sustained Traffic Rate (bps)	Minimum Reserved Traffic Rate (bps)	Maximum Latency (milliseconds)	Maximum Traffic Burst (bytes)	Traffic Priority	Unsolicited Poll Interval (milliseconds)
2	Silver	rtPS	1.5 Mbps	1.5 Mbps	20.0	0	Not Used	Auto Calculated
4	Basic Control Class	Best Effort	32 Kbps	32 Kbps	30.0	0	Not Used	Auto Calculated
6	Blue Class	rtPS	256 Kbps	256 Kbps	20.0	0	Not Used	Auto Calculated
3	Platinum	rtPS	1160000	1160000	20.0	0	Not Used	Auto Calculated
0	Bronze	rtPS	1250000	1250000	20.0	0	Not Used	Auto Calculated
5	Diamond	nrtPS	1600000	1600000	20.0	0	Not Used	Auto Calculated
1	Gold	rtPS	5100000	5100000	20.0	0	Not Used	Auto Calculated

Figur A.4.1-10: MAC tjenesteklasse definisjoner. Tjeneste navn, Scheduling type, maks. Trafikk rate for hver klasse, ventetid, UPI-er, osv, er alle funksjoner editert og definert her.

Profile Name	CDMA Code (dB)	Fast Feedback (dB)	QPSK 1/2 (dB)	QPSK 3/4 (dB)	16QAM 1/2 (dB)	16QAM 3/4 (dB)	64QAM 1/2 (dB)	64QAM 2/3 (dB)	64QAM 3/4 (dB)	64QAM 5/6 (dB)
0 Default Normalized C/N Table	3.0	0.0	6.0	9.0	12.0	15.0	18.0	20.0	21.0	23.0

Figur A.4.1-11: Verdiene i denne tabellen er definert i Std dokument [7] – table 334.

Profile Name	Frame Duration (milliseconds)	Symbol Duration (microseconds)	Number of Subcarriers	Frame Structure	Duplexing Technique	TC Sublayer Overhead Factor	Frequency Band	Frequency Division
0 WirelessOFDMA 10 MHz	5	102.86 (n=28/25, delta_...	1024	(...)	TDD	0.0	(...)	(...)

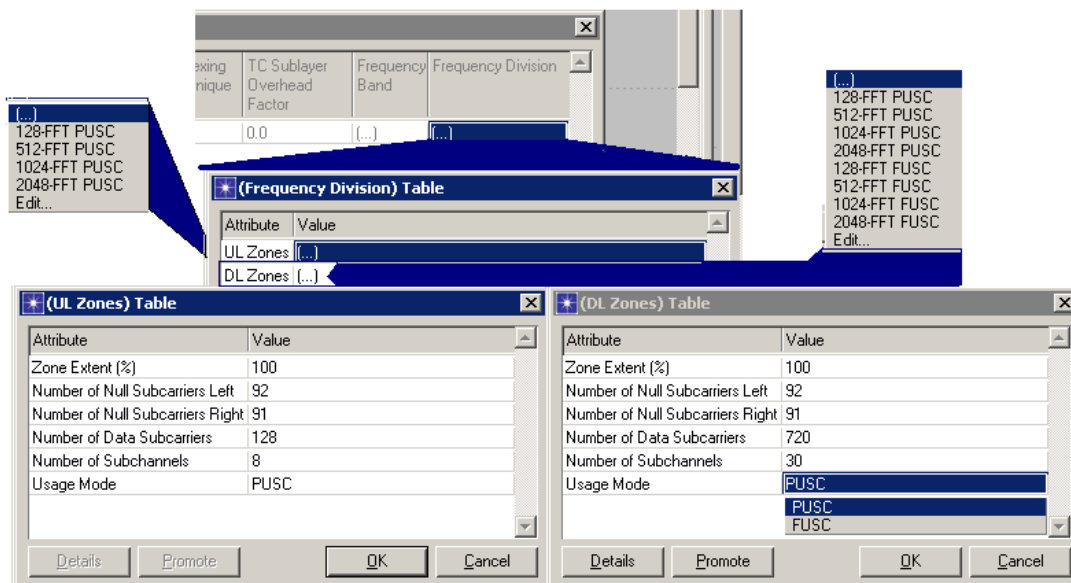
Attribute	Value
Frame Preambles (symbols)	1
TTG (microseconds)	106
RTG (microseconds)	60
UL/DL Boundary	(...)
DL-MAP Repetition Count	No Repetition Coding
DL Information Element Size (bits)	32
Contention Area	(...)
Fast Feedback Area	(...)

Attribute	Value
Base Frequency (GHz)	2.5
Subcarrier Frequency Spacing (kHz)	10.9375

Figur A.4.1-12: OFDM PHY profiler. Figuren i seg forklarer oppsetting utført i dette arbeidet. Frekvensbånd felt er ikke editierbar, det er kun 3 delbærere mellomrom tilgjengelige for WiMAX modulen (se tabell 4.5-11).

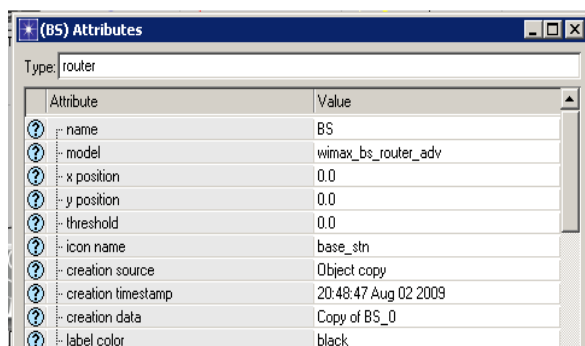
Viktig!

Merk at **UL/DL Boundary** attributt i figuren regulerer størrelse (i symboler) for UL delramme i hver radiatoramme. OPNET Modellen tillater ikke en DL delramme som er mindre enn 25% av total symboler i rammen. Derav hver UL delramme konfigurasjonen som viser seg å være større enn 75% av rammen vil bli redusert til eller litt under 75% av rammen.



Figur A.4.1-13: Frekvens deling. I frekvensdeling kan UL og DL soner spesifiseres. UL støtter bare PUSC mens DL soner støtter både PUSC og FUSC. Tabellene viser oppsettinger utført i dette arbeidet.

A.4.2. Basestasjons konfigurasjon



BS utfører flg funksjoner:

1. Adgangskontroll,
2. Båndbredde tildeling algoritme (BW grant scheduler),
3. MAP generering,
4. Aktivering av utførte tjeneste flyting,
5. Sending av nabo annonse,
6. Tilordne SS/MS til å starte skanningsmodus,
7. Svare på alle meldinger,
8. Utgi SS/MS ressurser etter handover.

Figur A.4.2-1: BS (Attributes). Figuren viser et snitt av øvre delen hvor en kan gi b.a. navn på objektet, posisjon i nettverk, osv.

Noen av BS parameterne blir med en gang tilgjengelige ettersom WiMAX Config objektet er blitt konfigurert og lagret. De andre er lokalt konfigurert, f.eks., antenne vinning, effekt, følsomhet, antenne høyden, MAC tjeneste klasser klassifisering, osv.

The screenshot displays two panels from the WiMAX Config software. The left panel, titled '(BS Parameters) Table', lists various attributes and their values. The right panel, titled '(BS) Attributes', shows a tree view of the configuration for a 'router' type, with 'BS Parameters' highlighted in red.

Attribute	Value
Maximum Number of SS Nodes	100
Received Power Tolerance	(...)
CDMA Codes	(...)
Backoff Parameters	(...)
Mobility Parameters	Default
Channel Quality Averaging Parameter	4/16
Number of Transmitters	SISO
ASN Gateway IP Address	Disabled
DL AMC Profile Set	Default DL Burst Profile Set
UL AMC Profile Set	Default UL Burst Profile Set
CQICH Period	Accept SS Configured Value
Normalized C/N Profile	Default Normalized C/N Table
Reserved DL Subframe Capacity (%)	No Reservation
Reserved UL Subframe Capacity (%)	No Reservation
UL Loading Factor	1.0
DL Loading Factor	1.0

Attribute	Value
ATM-IP Interface	
ATM	
Address	Auto Assigned
WIMAX Parameters	
Antenna Gain (dBi)	15 dBi
BS Parameters	(...)
Classifier Definitions	(...)
MAC Address	Auto Assigned
Maximum Transmission Power (W)	10
PHY Profile	WirelessOFDMA 10 MHz
PHY Profile Type	OFDM
PermBase	6
Receiver Sensitivity	-111.1
altitude	32
altitude modeling	relative to subnet-platform

Figur A.4.2-2: BS parametere og klasse definisjoner.

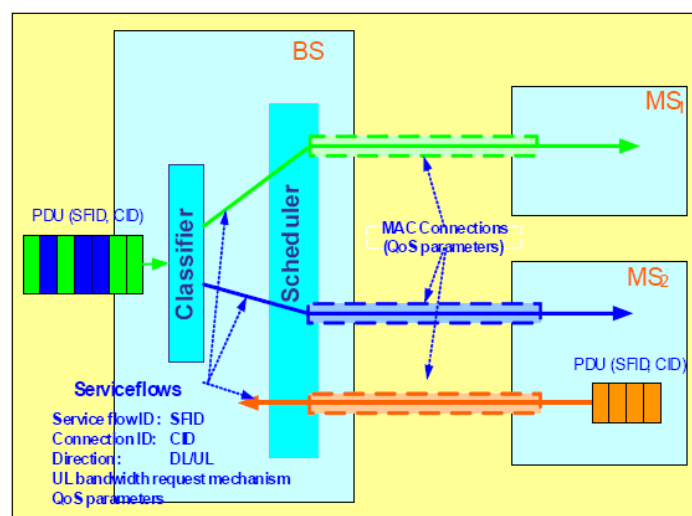
The screenshot shows two overlapping windows from the WiMAX Config software. The top window, titled '(Classifier Definitions) Table', displays a table of service classes. The bottom window, titled '(Traffic Characteristics) Table', shows the configuration for a specific traffic characteristic.

	Type of SAP	Traffic Characteristics	Service Class Name
0	IP	(...)	Bronze
1	IP	(...)	Gold
2	IP	(...)	Silver
3	IP	(...)	Platinum
4	IP	(...)	Diamond
5	IP	(...)	Blue Class

Attribute	Value
Match Property	IP ToS
Match Condition	Equals
Match Value	voice
	Any
	--- ToS / DSCP ---
	Best Effort (0)
	Background (1)
	Standard (2)
	Excellent Effort (3)
	Streaming Multimedia (4)
	Interactive Multimedia (5)
	Interactive Voice (6)

Figur A.4.2-3: Tilknytning av trafikk til service klasser. Trafikk egenskaper, type av SAP over service klasser er i denne attributten klassifisert. Alle tjenester blir på forhånd definert gjennom WiMAX Config noden (figur A.4.1-10).

Basestasjonen og brukerterminalen etablerer først en enveis logisk kobling mellom peer MACs som kalles en tilkobling (eng. Connection), før en type datatjeneste kan gjennomføres. Den utgående MAC deretter assosierer pakker som gjennomgår MAC-grensesnitt inn i en flytingstjeneste som skal leveres over forbindelsen. Servicekvalitets parameterne forbundet med flytingstjenesten definerer overføringsmodus og planlegging (scheduling) på radiogrensesnittet. Denne forbindelsesorientert QoS kan derfor gi nøyaktig kontroll over radiogrensesnitt. Flytingstjenester basert på QoS mekanismen gjelder i både DL og UL for å gi en forbedret QoS i begge retninger, se figuren nedenfor.



Figur A.4.2-4: Mobile WiMAX QoS (Quality of Service) utvikling [9]. Se *MAC Service Class Definitions* i figur A.4.1-10 og *Classifier Definitions* i figur A.4.2-3 for en bedre forståelse av figuren over.

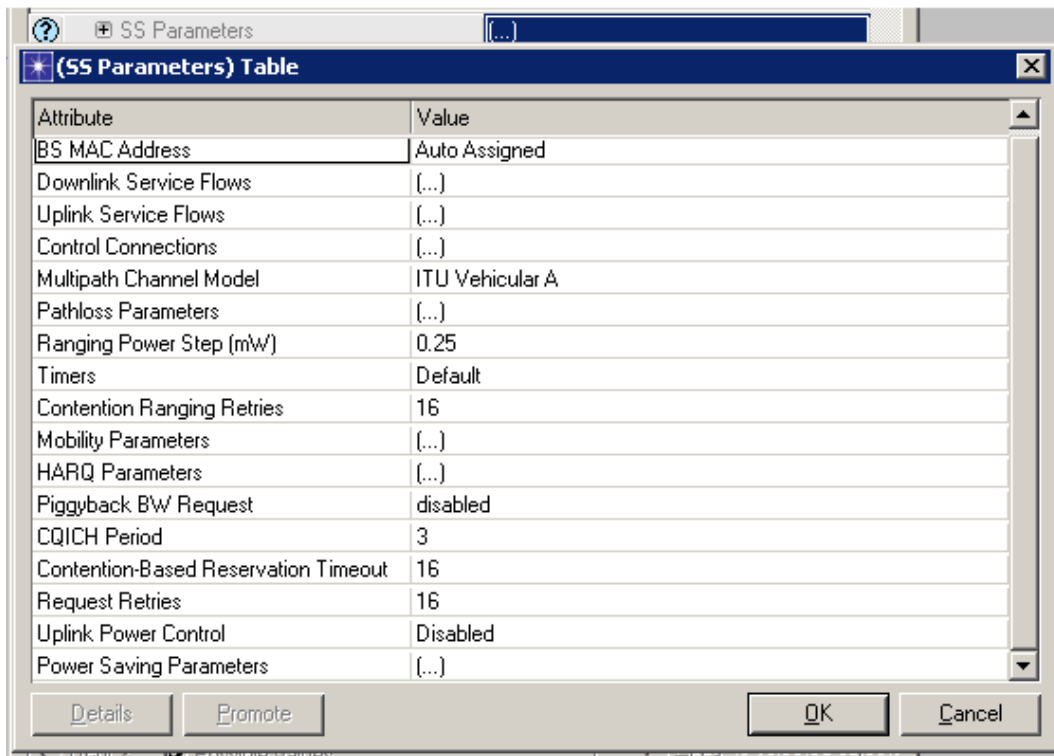
A.4.3. Mobilstasjonsattributter konfigurasjon

*(SS_ITU_VehA) Attributes	
Attribute	Value
Type	workstation
name	SS_ITU_VehA
model	wimax_ss_wkstrn_adv
x position	0.0
y position	1,600
trajectory	NONE
+ WiMAX Parameters	
altitude	1.5
altitude modeling	relative to subnet-platform
condition	enabled

Funksjoner utført av SS/MS:

1. Adgangskontroll initiering,
2. Aktivering av tjeneste flyting,
3. MAP dekode
4. Handover initiering
5. Starte Skanning modus, skanning nabo BS, (avstandsmåler (første og periodiske))
6. Velge tjener basestasjonen.

Figur A.4.3-1: Mobilstasjon attributter. I tillegg til WiMAX parametere, kan plassering, trasjektorie, mobil høyden, osv, spesifiseres i mobilenheter. I denne konfigurasjonen er MS statistisk ved 1.6 km fra BS, og høyden er satt på 1.5 meter.

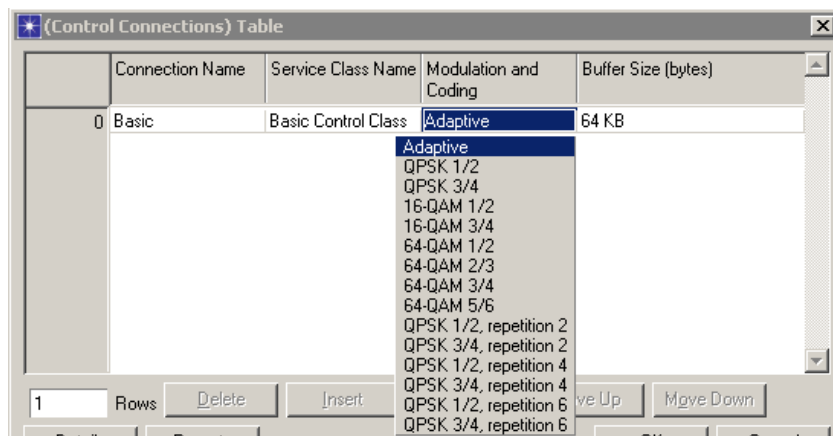


Figur A.4.3-2: SS parametere er undermapper av WiMAX parametere.

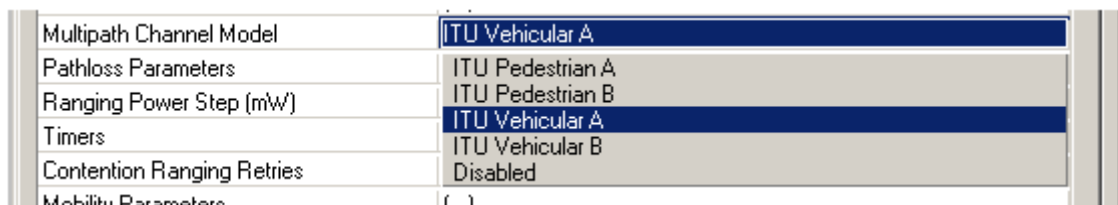
*(Downlink Service Flows) Table									
	Service Class Name	Modulation and Coding	Average SDU Size (bytes)	Activity Idle Timer (seconds)	Buffer Size (bytes)	ARQ Parameters	PDU Dropping Probability	CRC Overhead	HARQ Enabled
0	Platinum	16-QAM 1/2	1500	60	64 KB	(...)	Disabled	Disabled	Disabled
1	Gold	16-QAM 1/2	1500	60	64 KB	Disabled	Disabled	Disabled	Disabled
2	Silver	16-QAM 1/2	1500	60	64 KB	Disabled	Disabled	Disabled	Disabled
3	Diamond	16-QAM 1/2	1500	60	64 KB	Disabled	Disabled	Disabled	Disabled
4	Bronze	16-QAM 1/2	1500	60	64 KB	Disabled	Disabled	Disabled	Disabled

*(Uplink Service Flows) Table									
	Service Class Name	Modulation and Coding	Average SDU Size (bytes)	Activity Idle Timer (seconds)	Buffer Size (bytes)	ARQ Parameters	PDU Dropping Probability	CRC Overhead	HARQ Enabled
0	Blue Class	16-QAM 1/2	1500	60	64 KB	(...)	Disabled	Disabled	Disabled
	Bronze	Adaptive	1500						Enabled
	Gold	QPSK 1/2	512						Disabled
	Silver	QPSK 3/4	Edit...						
	Platinum	16-QAM 1/2							
	Basic Control Class	16-QAM 3/4							
	Diamond	64-QAM 1/2							
	Blue Class	64-QAM 2/3							
		64-QAM 3/4							
		64-QAM 5/6							
		QPSK 1/2, repetition 2							
		QPSK 3/4, repetition 2							
		QPSK 1/2, repetition 4							

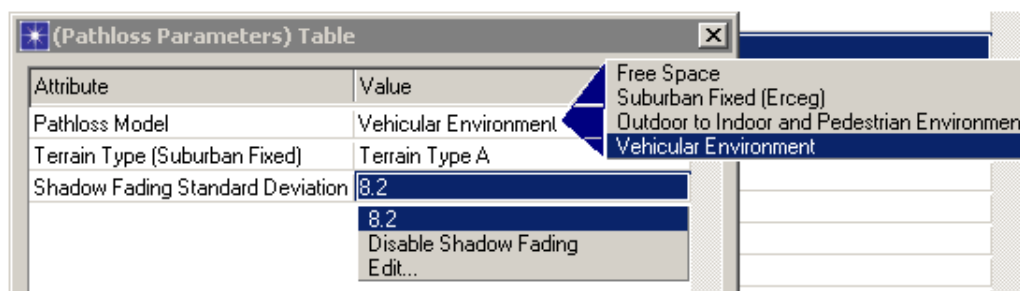
Figur A.4.3-3: DL og UL tjenester flyting. Attributen tilknytter service klasser til MCS, SDU kapasitet, buffer, og andre trafikk kontroll funksjoner.



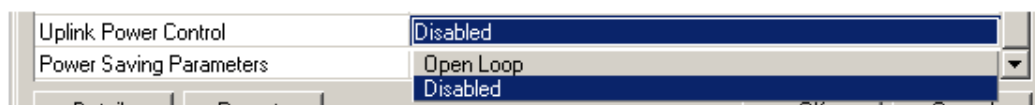
Figur A.4.3-4: Tilkoblingsstyring mellom BS og MS er konfigurert gjennom denne attributten. Oppsetting er gjensidige, dvs. At både BS og MS skal ha samme konfigurasjon.



Figur A.4.3-5: Multipath kanal modeller. Denne attributten kan også velges bort ved å sette *Disabled* i stedet.



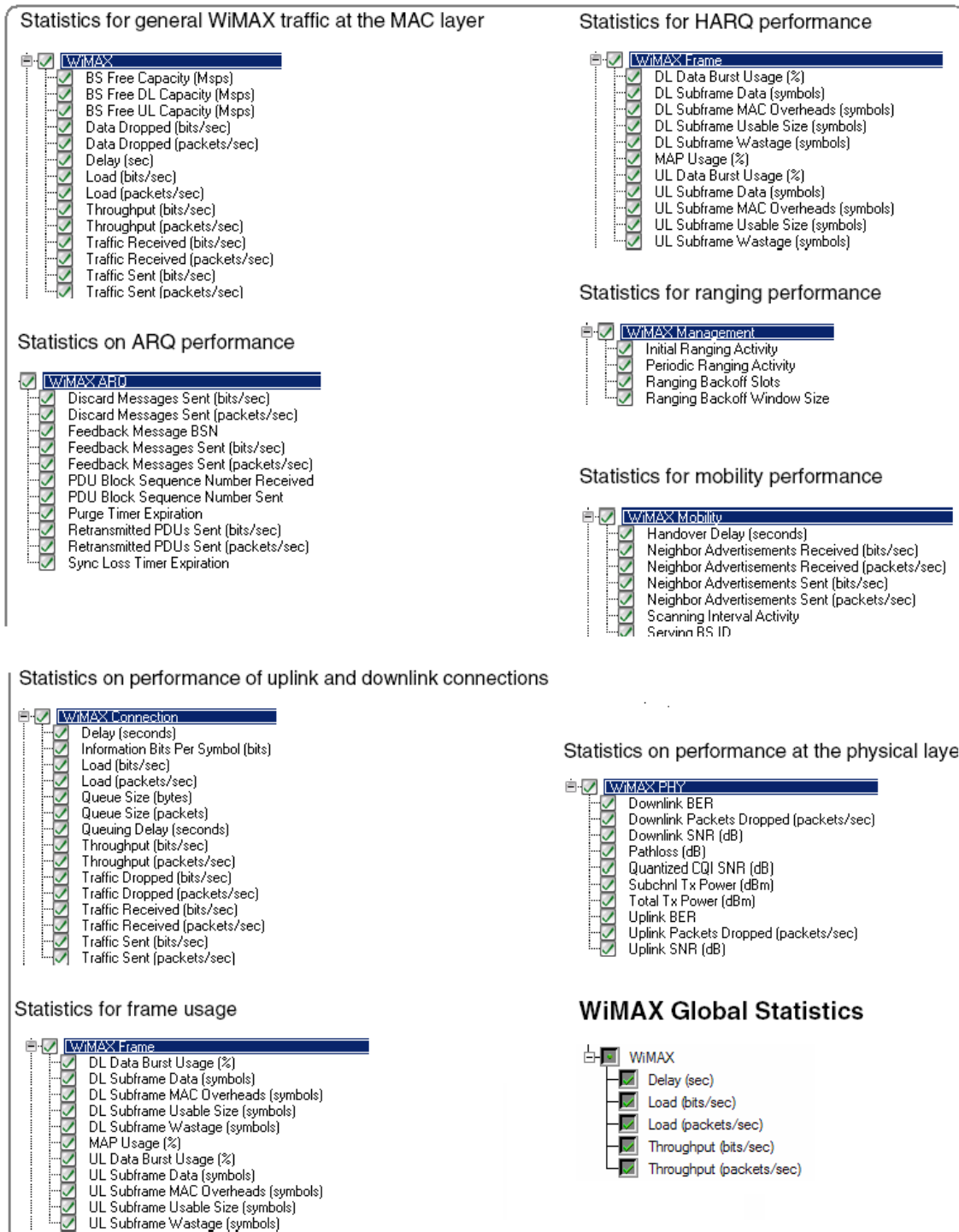
Figur A.4.3-6: Pathloss parametere. Fire pathloss modeller er tilgjengelige i Opnet, der *Vehicular Environment* ble valgt for dette arbeidet. Terrain Type har kun effekten over Erceg modell. Shadow fading kan også velges bort, men den er på 8.2 dB i vårt tilfellet.



Figur A.4.3-7: Opplink effekt styring. Denne funksjonen kan aktiveres eller deaktiveres på abonnentstasjonen og påvirker OFDMA sendinger på UL kanaler.

A.4.4. WiMAX nettverksanalyse

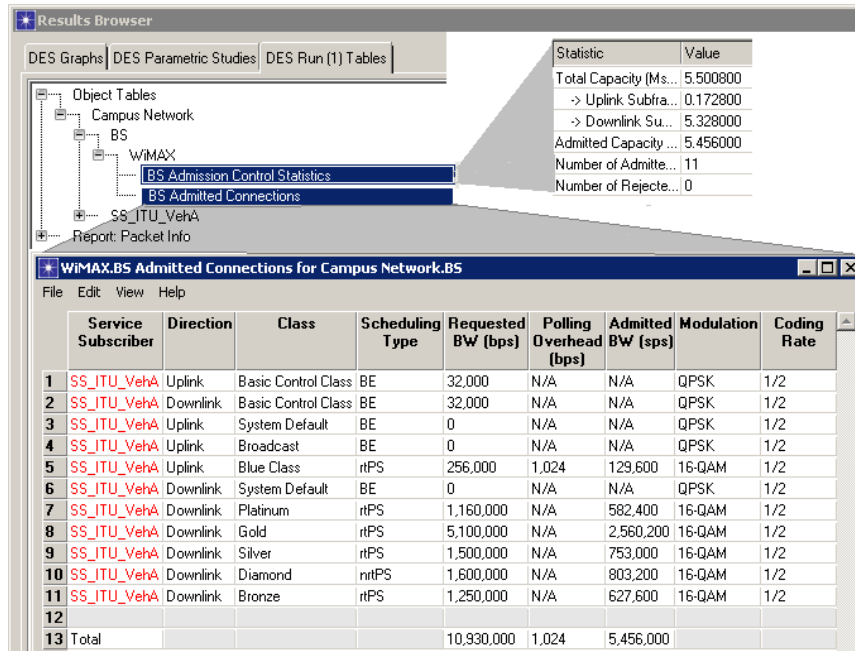
For å analysere WiMAX ytelse, kan en samle flere statistikker og analyse rapporter om WiMAX oppførsel i et scenario. Tilgjengelige statistikker kan samles på tre måter: Globalt, per-node, eller per-tilkoblingsbasis.



Figur A.4.4-1: Tilgjengelige statistikker for WiMAX nettverker.

Tilgjengelige rapporter

WiMAX Modeller sett inneholder rapporter som lar deg vise detaljer om tilførte og avviste tilkoblinger for hver basestasjonen. Disse rapportene er tilgjengelige fra *Discrete Event tables* kategorien i *View Results* dialogboksen, de er generert automatisk for alle scenarier som bruker WiMAX, slik at du trenger ikke å velge disse rapportene før du kjører en simulering.



Figur A.4.4-2: Tilgjengelige rapporter.

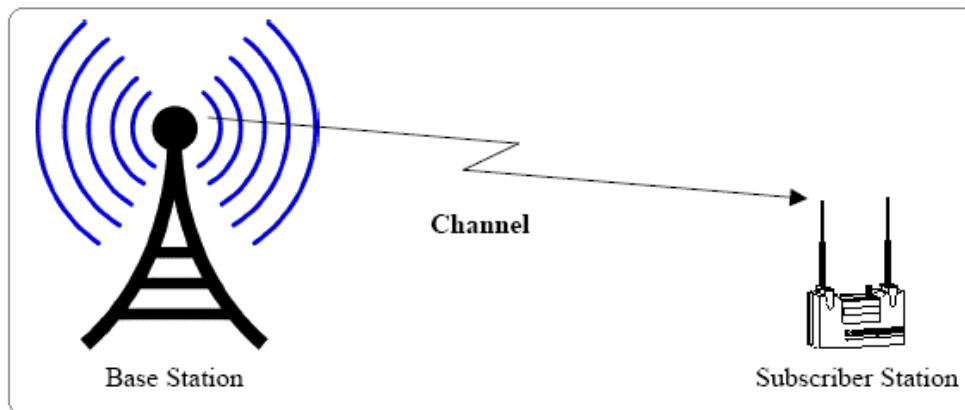
Vedlegg B: Trådløse kanalmodeller

B.1. Grunnleggende konsepter

Alle konseptene i dette vedlegget er hentet fra [4] og ([23], s.160).

B.1.1. Trådløs kanal

Begrepet kanal eller trådløs kanal i vårt tilfelle refererer til mediet mellom senderantenne og mottakerantenne som vist på figur B-1.



Figur B-1: Kanal, [23].

Egenskaper til trådløst signal endrer seg etter som signalet stråler fra senderantenne til mottakerantenne. Disse egenskapene er avhengige av avstanden mellom de to antennene, signalvei (s), og miljø (bygninger og andre objekter) der signalet forplanter seg. Profilen til mottatte signalet kan fås fra det overførte signalet hvis vi har en viss modell av mediet mellom senderen og mottakeren. Denne modellen av medium kalles kanalmodell.

Generelt kan effektprofil (eng. Power profile) til det mottatte signalet fremstilles ved å konvolvare effektprofilen av det overførte signalet med kanals impulsrespons. Konvolusjon i tidsdomenet tilsvarer multiplikasjon i frekvensdomenet. Dersom er x det overførte signalet, så blir det mottatte signalet y som forplanter seg gjennom kanalen \mathbf{H} , gitt ved:

$$y(f) = \mathbf{H}(f) x(f) + n(f).$$

Her $\mathbf{H}(f)$ er kanalens respons, og $n(f)$ er støysignal. Merk at $y, \mathbf{H}, x, og n$ er alle funksjonene av frekvens f i signalet. De tre hovedkomponentene i kanalens respons er banetap (eng. Path loss), radioskygge (eng. shadowing), og flervei (multipath).

B.1.2. Banetap

Fri-siktlinje (free space LOS) med noen objekter mellom mottakeren og senderen eller rundt banen mellom dem er den enkleste kanalen. I dette enkle tilfellet svekkes det overførte signalet på grunnlag av at energien er sfærisk spredt rundt senderantenna. For LOS-kanalen er mottatte effekten gitt ved:

$$P_r = P_t \left[\frac{\sqrt{G\lambda}}{4\pi d} \right]^2 \equiv P_t G \left[\frac{\lambda}{4\pi d} \right]^2 \quad (B1)$$

Her er P_t den overførte effekten, G er produktet av sender og mottaker forsterkningsfaktor eller antennes strålingsmønster, λ er bølgelengden, og d er avstanden. Teoretisk sett avtar effekten i forhold til kvadratet av avstanden. I praksis avtar effekten noe raskere, vanligvis potens i tredje eller fjerde av veilengde. Bakken har også innflytelse, den fører noen av bølger til å reflektere og oppnå frem til mottakeren. Disse reflekterte bølgene har noen ganger en fase skift på 180° , og slik kan total mottatte effekten reduseres. En enkelt tilnærming av to-strålers tap som kalles Plane Earth Pathloss kan beskrives ved :

$$P_r = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4}, \quad (B2)$$

Her er h_t og h_r sender- og mottakerantenne høyder henholdsvis ([28], s.100). Merk forskjellen mellom $B2$ og $B1$. Først har antennehøyder innflytelse. Det andre er bølgelengden bort og tredje er avstandsekspONENTEN 4. Generelt er en felles empirisk formel for banetap gitt ved:

$$P_r = P_t P_0 \left(\frac{d_0}{d}\right)^\alpha,$$

Der: $P_0 \rightarrow$ er effekt ved avstand d_0 , og
 $\alpha \rightarrow$ er eksponenten

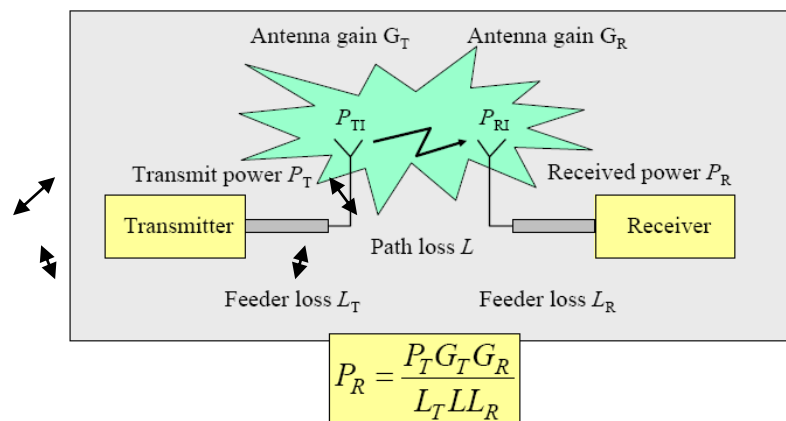
Banetap er endelig gitt av:

$$PL(d) [dB] = \overline{PL}(d_0) + 10\alpha \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (B3)$$

der $\overline{PL}(d_0)$ er middelveidien av tapet i dB ved avstand d_0 .

B.1.2.1 Grunnleggende utbredelsesbegreper

En enkel trådløst link modell er illustrert i figur B-1a.



Figur B-1a: Elementer av et trådløst kommunikasjonssystem [43].

Den EIRP og P_{RI} er gitt ved: $EIRP = P_{TI} = \frac{P_T G_T}{L_T}$, og $P_{RI} = \frac{P_R L_R}{G_R}$

Fordelen ved å uttrykke signalstyrken ved hjelp av EIRP er at Banetapet, L , kan nå uttrykkes uavhengig av system parametere. Den EIRP er på denne måte gitt mellom sender- og mottakers EIRP. Dette er tap for et signal ved idealisert system der $L_T = 0$, og en antenne som stråler i alle retninger ($G_{R,T} = L_{R,T} = 1$), [28]:

$$\text{Banetap, } L = \frac{P_{TI}}{P_{RI}} = \frac{P_T G_T G_R}{P_R L_T L_R} \quad (B4)$$

Hovedmålet med propageringsmodellering er å forutse L så nøyaktig som mulig, slik at rekkevidde av et radiosystem skal fastsettes før installasjon. Den maksimale systemrekkevidden skjer når den mottatte signalstyrken faller under et terskelnivå som gir akkurat akseptabel kommunikasjonskvalitet. Dette nivået er ofte kjent som *mottaker følsomhet*. Verdien av L hvilket dette signalnivået er motatt kalles for **det maksimale tillatelig banetapet**. Dette er faktisk summen av avstandsavhengig tap (fritt rom eller lignende) og fade marginsbidrag. Formelen (B4) kan omskrives i decibels:

$$L_{dB} = 10 \log \left(\frac{P_{TI}}{P_{RI}} \right)$$

Formel B1 kan da omskrives slik at den uttrykker en propageringstap i **fritt rom**:

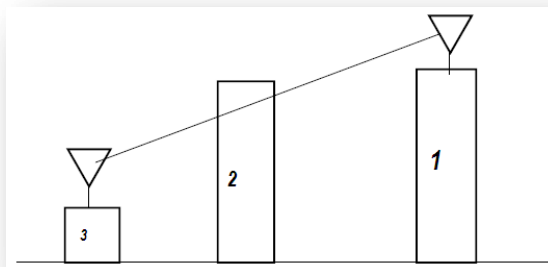
$$L_F = G \frac{P_t}{P_r} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{4\pi d f}{c} \right)^2$$

$$L_{F(dB)} = 32.4 + 20 \log R + 20 \log f [MHz] \quad (B5)$$

For eks.: $f = 2500$ MHz og $R = 1.4$ Km: er fritt romstapet, $L_F = 103.2814$ dB

B.1.3. Skygge

Hvis det er noen gjenstander (f.eks. bygninger eller trær) langs signalvei, vil deler av det overførte signalet gå tapt gjennom fenomener som kalles absorpsjon, refleksjon, spredning (eng. Scattering), og diffraksjon. Denne effekten kalles for skygge. Dersom BS's antenne (i bygning 1) var en lyskilde ville bygningen nummer 2 kaste skygge på mottakersantenne i bygning 3. Derav navnet skygge, se figur B-2.



Figur B-2: Skygge [23].

Linjen som binder mottaker- og senderantennen viser mottatt effekt som funksjon av avstand fra senderen eller omvendt.

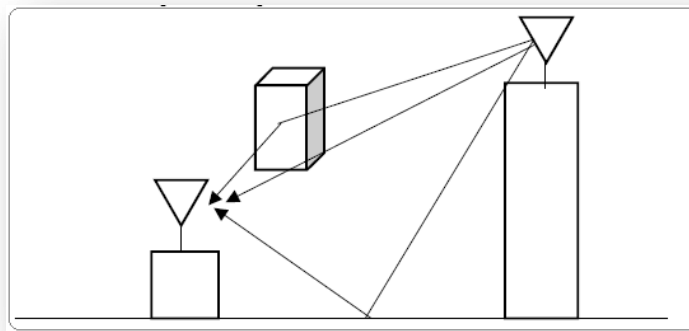
Nå kan formelen (B3) omskrives med skygges bidrag :

$$PL(d) [dB] = \overline{PL}(d_0) + 10\alpha \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \chi \quad (B6)$$

Her er χ en tilfeldig variabel normalfordelt (gaussisk) med standardavvik σ , gitt i dB. χ representerer effekten av skygge. På grunn av skygges innvirkning blir mottatte effekt forskjell i de punktene med samme avstand rundt senderen. Dette signalet er lognormalfordelt og fenomenet kalles lognormal skygge.

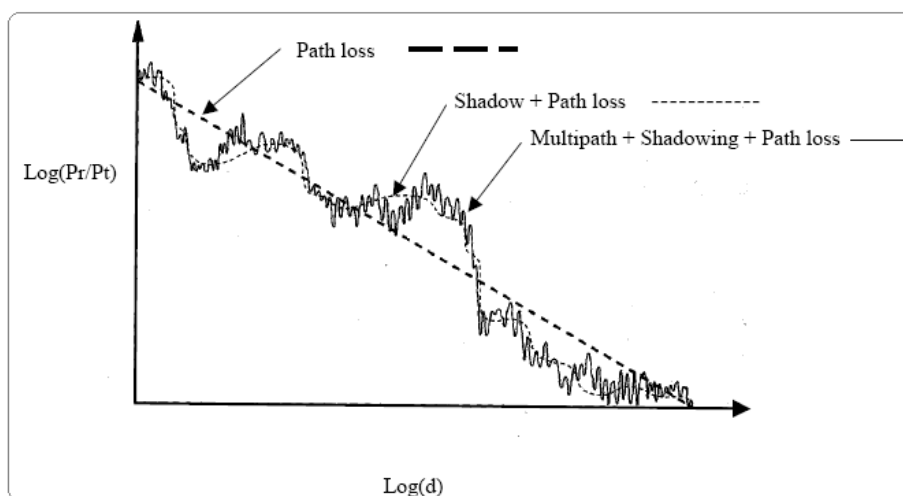
B.1.4. Flerveis utbredelse

Objektene som ligger rundt propageringsbane til det trådløse signalet reflekterer noen komponenter av signal. Noen av disse reflekterte bølger (kopier) ankommer også frem til mottaker. Enket kopier tar ulike vei til mottakeren, og vil sannsynlig ha forskjell amplitude og fase.



Figur B-3: Flervei fenomenet [23].

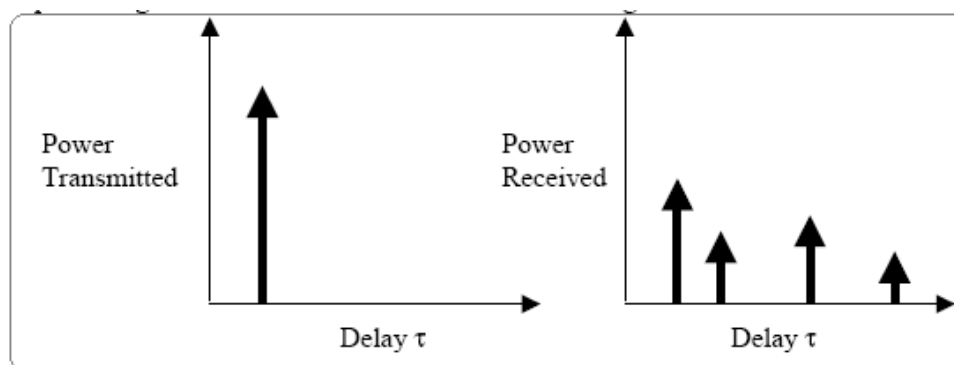
Avhengig av fase kan disse flere kopiene føre til økt eller redusert mottakerseffekt. Selv en liten endring av mottakersplassering kan føre til en betydelig forskjell i faser av kopi-signaler og så i den totale mottatte effekten. De tre kanalkomponentene er illustrert i figur B-4.



Figur B-4: Flervei, banetap og skygge [23].

Den tykke stiplede linjen representerer veitap, den tynne stiplede linjen er lognormal skygge som endrer det totale tapet, og den heltrukne tykke linjen er flervei som viser variasjoner. Merk at signalstyrke variasjoner er begrunnet at flervei komponenter endrer på avstander i rekkevidde av signalbølgelengde.

Siden forskjellige baner er av ulike lengder, vil enkelt kanalimpuls resultere i flere kopier på ulike tidspunkter, se figur B-5.



Figur B-5: Effekts forsinkelsesprofil ved flerveis utbredelse [23].

Den maksimale forsinkelsen etter som det mottatte signalet blir ubetydelig kalles maksimal spredsforsinkelse τ_{\max} . En stor τ_{\max} indikerer en svært dispersiv kanal. Ofte brukes (RMS) root-mean-square verdi av spredt forsinkelse τ_{rms} i stedet for τ_{\max} .

Hvis senderen, mottakeren eller til og med andre objekter i kanalen flytter seg, vil kanalens egenskaper endre seg. Tiden der kanalens egenskapene antas å være konstant kalles koherens tid. Dette er en forenklet definisjon i den forstanden at nøyaktig måling av koherens tid krever bruk av autokorrelasjon funksjonen. For hvert fenomen i tidsdomenet er det et tilsvarende fenomen i frekvensdomenet. Hvis en ser på Fourier Transform av effekts forsinkelsesprofil, kan vi få frekvens-avhengigheten av kanalens egenskaper. Frekvens båndbredden for hvilket kanalens egenskaper forblir nesten like kalles *koherens båndbredde*. Igjen, en mer streng definisjon krever fastsettelse av autokorrelasjon på kanalens egenskaper. Koherens båndbredden er omvendt relatert til spredt forsinkelsen. Jo større spredt forsinkelse jo mindre er koherens båndbredde. Med andre ord er dette en *frekvens-sektiv kanal*.

B.1.5. Doppler spredsspektrum

Effekt forsinkelsesprofilen gir statistiske effektfordeling på kanalen over tid for et signal overført for bare et øyeblikk. På samme måte, gir Doppler effekt spektrum den statistiske effektfordelingen av kanalen for et signal overført på kun én frekvens f . Mens effekt forsinkelsesprofilen er forårsaket av flervei fenomenet, skyldes Doppler spekteret av belegg på mellomliggende objekter i kanalen. Doppler effekt spektrum er ulike null for $(f - F_D, f + F_D)$, der F_D er maksimal Doppler, eller Doppler spennvidde. Den koherens tida og Doppler-spennvidde er omvendt relatert:

$$\text{Koherens Tid} \approx \frac{1}{\text{Doppler Spennvidde}}, \text{ og } F_D = \frac{vf_c}{c} \quad (B7)$$

Der v er maksimal hastighet mellom senderen og mottakeren, f_c er frekvens bærer, c er lyshastighet. Dermed, hvis senderen, mottakeren, eller mellomliggende objekter beveger seg svært raskt, er Doppler spredningen stor og koherens tida er liten, dvs. Kanalen endres raskt. Tabell B-1 viser typiske verdier for Doppler spennvidde og tilhørende kanals koherens tid for to WiMAX frekvensbånd. Merk at ved høy mobilitet, endrer kanalen 500 ganger per sekund, noe som krever god kanal estimeringsalgoritmer.

Carrier Freq	Speed	Max Doppler Spread	Coherence Time
2.5 GHz	2 km/hr	4.6 Hz	200 ms
2.5 GHz	45 km/hr	104.2 Hz	10 ms
2.5 GHz	100 km/hr	231.5 Hz	4 ms
5.8 GHz	2 km/hr	10.7 Hz	93 ms
5.8 GHz	45 km/hr	241.7 Hz	4 ms
5.8 GHz	100 km/hr	537 Hz	2 ms

Tabell B-1: Typiske Doppler Spennvidder og Koherens Tider for WiMAX transmisjoner, ([4], table 3.4).

B.2. Empiriske banetap modeller

Miljøer er faktisk for komplisert å modellere nøyaktig. I praksis, benyttes i fleste simuleringstudier empiriske modeller som er utviklet basert på målinger tatt i ulike virkelige miljøer. I denne delen er et generelle overblikk gitt for en rekke vanlige empiriske modeller, og med hovedfokus til ITU modeller fordi Opnet benytter disse for mobile WiMAX simuleringer. Siden WiMAX bruker Hata modell for ytelses sammenligning "case" i [23], er denne modellen også illustrert i kort trekk. De meste omtalte empiriske modeller er:

Empiriske Banetap modeller		
Modell	Anvendelse / celle	Frekvensbånd [MHz]
Hata model	Lange (over 1 Km)	150 – 1500
COST 231(Utvidet Hata model)	Lange, Små Makro	1500 – 2000
COST 231-Walfish-Ikegami	Mikro, Små Makro	800 – 2000
Erceg	Makro	1900
ITU	Innendørs kontor, O-til-I Ped, Kjøretøy	Hele IMT frekvensbånd [27]

Tabell B-2: Empiriske modeller oppsummering.

B.2.1. Hata banetap modell

Den Europeske COST (cooperative for Scientific and Technical) forskningen utvidet Hata modellen til 2 GHz som følger:

Den originale "Okumura-Hata Pathloss" modellen er:

$$P_{L,urban}(d) = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f_c) - 13.82 \log_{10}(h_t) - a(h_r) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_t)) \log_{10}(d)$$

Den utvidede Hata modellen som kalles ofte "COST 231-Hata" er:

$$P_{L,urban}(d) = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f_c) - 13.82 \log_{10}(h_t) - a(h_r) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_t)) \log_{10}(d) + C_M \quad (B8)$$

Her er C_M lik 0 dB for mellomstore byer og forsteder (eng. suburbs), og er omtrent 3 dB for storbyområder; f_c er bærefrekvens; h_t er høyden på sender (BS) antenne, h_r er høyden på mottaker (mobil) antenne, og $a(h_r)$ er en korreksjonsfaktor for mobil antenne høyde basert på størrelse av dekningsområdet, etter COST 231 er faktoren gitt ved:

$$a(h_r) = (1.11 \times \log_{10}(f) - 0.7)h_r - (1.56 \times \log_{10}(f) - 0.8) \quad (\text{middel og små byer})$$

$$a(h_r) = 3.2(\log_{10}(11.75h_r))^2 - 4.97 \quad (\text{stor byer: } f_c \geq 300 \text{ MHz})$$

$$a(h_r) = 8.29(\log_{10}(1.54h_r))^2 - 1.1 \quad (\text{stor byer: } f_c < 300 \text{ MHz})$$

Carrier Frequency	1.5 GHz to 2 GHz
Base Antenna Height	30 m to 300 m
Mobile Antenna Height	1m to 10 m
Distance d	1 km to 20 km

COST 231- Hata modellen er utvidet for store og små makro-celler, f.eks. Basestasjonsantenne høyder over taket nivåer som befinner seg i nær BS-området.

Tabell B-3: Parametere som begrenser Hata modellen.

Den COST 231 Hata propagasjonsmodellen er basert på empiriske resultater i 2 GHz-båndet og har tendens til å gjøre svært konservativt prediksjon på 2.5 GHz, ifølge ([23], s.200).

For: $f_c = 2500$ MHz, $h_t = 32$ m, $h_r = 1.5$ m, $d = 1.4$ Km, og $C_M = 0(3)$ i forsteder(stor byer) er:

$$P_{L,suburban} = \underline{145.7027 \text{ dB.}}$$

$$P_{L,urban \text{ over } 300 \text{ MHz}} = \underline{138.8704 \text{ dB.}}$$

B.2.2. ITU banetap modeller

Den empiriske kanalmodellen er spesifisert i ITU-R normanbefaling M.1225. Rekommandasjonen angir tre forskjellige test miljøer: Innendørs (f.eks. kontor), utendørs-til-innendørs fotgjenger, og kjøretøy-høy antenne. Siden spredsforsinkelsen kan variere betydelig, angir normanbefalingen to forskjellige spredsforsinkelser for hvert testmiljø: Lav spredsforsinkelse (A), og middels spredsforsinkelse (B). I alt er det 6 tilfeller. For hvert av disse tilfellene, er antall flervei komponenter forskjell per modell. De viktigste parameterne for å beskrive hver propagasjonsmodell vil inkludere [27]:

- Tid spredsforsinkelse, dets struktur, og statistisk variasjon
- Geometriske bane-tap regler (f.eks. R^4)
- Skygge fading
- Multipath fading egenskaper (f.eks. Doppler spekteret, Rician vs Rayleigh) for envelope av kanaler.
- Bærefrekvens

For smalbands teknologier kan spredsforsinkelse karakteriseres av en enkel rms verdi, mens for bredbånd teknologier er antall signal komponenter viktig, samt signalstyrke, og relativ forsinkelse av de mange signal komponentene. For enkelte teknologier (f.eks. de som implementerer effekt-regulering) disse modellene må bestå av kopling mellom alle ko-kanal propagasjonslinker for å oppnå maksimale nøyaktighet. Også i enkelte tilfeller, stor-skalaen (skygge fading) tidsavhengig miljø variasjoner må modelleres.

Flg. tre tabell gjenviser de angitte parameterne i [27], samt formler knyttet til hvert miljø.

a) Innendørs kontor:

$$L = 37 + 30 \log_{10}(R) + 18.3 n \left(\frac{n+2}{n+1} \right)^{0.46}$$

Der R er BS – MS avstand i meter, f_c er bærefrekvens i MHz, og n antall etasjer.

Et eks., med R=60 m, n=3, gir: $L = 133.9335$ dB

Tap	Channel A		Channel B		Doppler spectrum
	Relative delay (ns)	Average power (dB)	Relative delay (ns)	Average power (dB)	
1	0	0	0	0	Flat
2	50	-3.0	100	-3.6	Flat
3	110	-10.0	200	-7.2	Flat
4	170	-18.0	300	-10.8	Flat
5	290	-26.0	500	-18.0	Flat
6	310	-32.0	700	-25.2	Flat

Tabell B-4: ITU kanal modell for innendørs kontor.

b) Utendørs til Innendørs:

$$L = 40 \log_{10}(R) + 30 \log_{10}(f_c) + 49,$$

Der R er BS – MS avstand i meter, f_c er bærefrekvens i GHz.

Et eks., med R=60 m, $f_c = 2500$ MHz: $L = 132.0643$ dB.

Tap	Channel A		Channel B		Doppler spectrum
	Relative delay (ns)	Average power (dB)	Relative delay (ns)	Average power (dB)	
1	0	0	0	0	Classic
2	110	-9.7	200	-0.9	Classic
3	190	-19.2	800	-4.9	Classic
4	410	-22.8	1 200	-8.0	Classic
5	-	-	2 300	-7.8	Classic
6	-	-	3 700	-23.9	Classic

Tabell B-5: ITU kanal modell for utendørs-til-innendørs og fotgjenger testmiljø.

c) Kjøretøy testmiljø:

$$P_L = 40 \times (1 - 4 \times 10^{-3} \times \Delta h_b) \times \log_{10}(R) - 18 \log_{10}(\Delta h_b) + 21 \log_{10}(f) + 80$$

Δh_b : er BS antenne høyden i meter fra taket nivå, kan variere (0-50 m) men 15 m er vanlig.

F.eks.: $f_c = 2500$ MHz, $\Delta h_b = 15$ m, $R = 1.6$ Km, gir dette: $L = \underline{131.4}$ dB

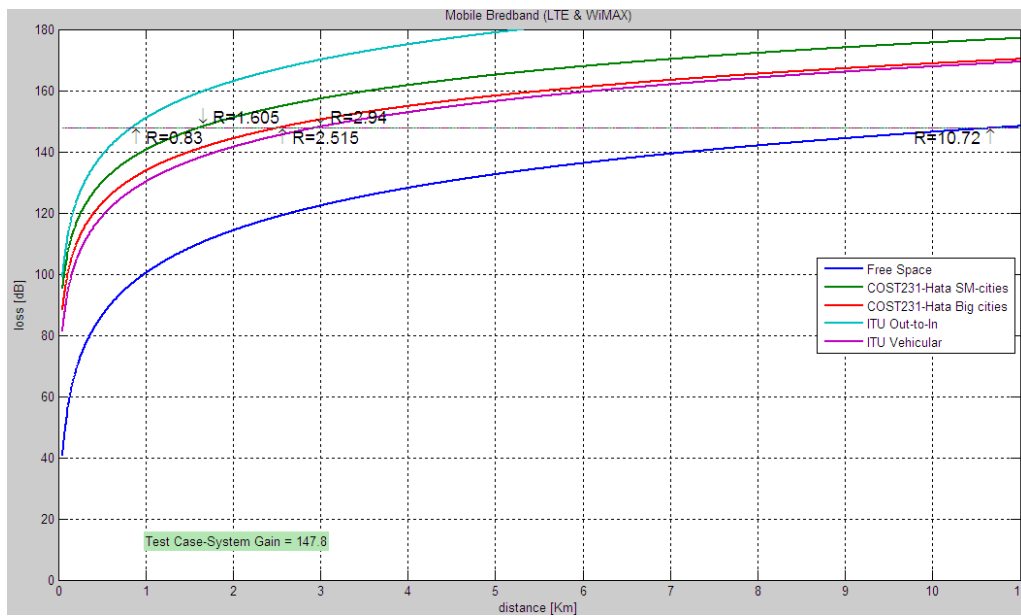
Tap	Channel A		Channel B		Doppler spectrum
	Relative delay (ns)	Average power (dB)	Relative delay (ns)	Average power (dB)	
1	0	0.0	0	-2.5	Classic
2	310	-1.0	300	0	Classic
3	710	-9.0	8.900	-12.8	Classic
4	1 090	-10.0	12 900	-10.0	Classic
5	1 730	-15.0	17 100	-25.2	Classic
6	2 510	-20.0	20 000	-16.0	Classic

Tabell B-6: ITU kanal modell for kjøretøy testmiljø.

Test miljø	Log-normal skygge fading [dB]	Kommentærer
Innendørs kontor (BS og SS innenfor kontor)	12	Bane-tapet regler varierer pga spredning og dempning gjennom vegger, etasjer, og metaller. Fading strekker seg fra Rician til Rayleigh, med fotgjenger Doppler opplevelser.
O-til-I (Små celler, lav Tx-effect)	10 (utendørs) 12 (innendørs) 12 (Std.dev. 8 dB) (bygning penetrasjon)	Geometrisk Bane-taps regel av R^4 er egnet. For LOS-canyons gate er R^2 til betraktning. For LOS-uten Fresnel sone fri-åpning: R^4 - R^6 .
Kjøretøy (lange celler og høy Tx effekt)	10 (urban og suburban) < 10 (rural)	Bane-tap regel av R^4 . I fjell områder der BS plassering skal velges gjelder R^2 .

Tabell B-7: Vanlige Feil marginer i ITU-R modeller pga skygge.

B.2.3. COST 231 Hata- versus ITU-modeller



Figur B-6: COST 231 Hata vs ITU-R modeller.

Figuren viser en simulasjon utført ved bruk av Matlab. COST 231 Hata ble sammenlignet med ITU-R modeller. Hensikten for simulasjonen var å bestemme marginsverdi mellom ITU-kanalmodellen (benyttet i OPNET) og COST 231 Hata Suburban modell (benyttet i Test Case).