



Evaluering av
bredbånds-
kommunikasjon over
HF kanaler på de
nordlige breddegrader

Thesisi submitted
for the degree
Master of Science in
Electronic and
computer
Engineering

July 2014

Gåsland, Magnar

Innledning

Gjennom de siste 20 årene har det kommet flere NATO standarder (STANAG 4285, STANAG 4415, STANAG 4529 og STANAG 4539) og standarder fra det amerikanske forsvar (MIL-STD-188-110B) som har sørget for pålitelig kommunikasjon over 3 kHz HF kanaler. Den høyeste data raten som er oppnådd innafor 3 kHz båndbredde er 9600 bits pr sekund. Generelt er det stadig et økende behov for økt overføringshastighet via radiokanaler og dette gjelder også for HF.

Det er nå utarbeidet en standard MIL-STD-188-110C som i annek D definerer en gruppe av bredbånds bølgeformer med anvendelse av båndbredde opp til 24 kHz med datarater fra 75 bps til 120.000 bps.

Historie

I 1865 gjorde den skotske fysikeren James Clerk Maxwell en viktig oppdagelse for utviklingen av kommunikasjon ved hjelp av elektromagnetiske bølger. Han hevdet at disse usynlige bølgene kunne sendes gjennom luften og noen år senere klarte den tyske vitenskapsmannen Heinrich Hertz å bevise at slike bølger kunne lages og at de hadde ulike bølgelengder. Det var nå flere vitenskapsmennesker som eksperimenterte med utsending av elektromagnetiske bølger, og i 1895 klarte en italiensk vitenskapsmann, Guglielmo Marconi, å lage et radio-telegraf system som fungerte. I 1901 klarte han å sende morse signaler over Atlanterhavet, men først i 1920 ble det første høyfrekvens (HF) kommunikasjonssystemet installert i Europa (County Galway, Irland) (Pike, 1999).

Mål

Evaluering av bredbånds-kommunikasjon over HF kanaler på de nordlige breddegrader

Denne oppgaven skal undersøke i hvilken grad bølgeformer definert i MIL-STD-188-110C vedlegg D for bredbands kommunikasjon over HF kanaler er anvendelige for nordområdene. Bølgeformene som benytter 3 kHz til 24 kHz båndbredde skal testes over en basisbånd simulator for å finne hvilke begrensninger bølgeformene har og videre sammenlignes med kjente data fra kanalforholdene i angitt område.

Opgaven skal også evaluere i hvilken grad det er plass til 24 kHz kanaler i HF-frekvensbåndet, og det skal foretas målinger i Nord og Sør-Norge i HF-kanalen.

Kan det forventes overføringer over HF kanalen ved anvendelse av en båndbredde på 24 kHz i nordområdene, og hvilken datarate kan det forventes å oppnå?

Summary

Evaluation of broadband communications over HF channels in the northern latitudes.

This paper will examine the extent to which waveforms defined in MIL-STD-188-110C Appendix D for broadband and communications over HF channels are useful for high latitudes. The waveforms that use 3 kHz to 24 kHz bandwidth will be tested over a baseband simulator to find the waveforms restrictions and these will be compared with known data from channel conditions in designated area.

The mission will also assess the extent to which there is space for 24 kHz channels in the HF frequency band, and it shall be conducted surveys in both northern and southern Norway in HF channel.

Can it be expected transmissions over HF channel using a bandwidth of 24 kHz in the north, and what data rate can be expected to achieve?

Innhold

Innledning.....	ii
Historie.....	ii
Mål.....	ii
1 Ionosfæren og dens betydning på HF-radiobølgeutbredelse	6
1.1 D laget (50-90 km)	6
1.2 E laget (90-130 km).....	6
1.3 F laget (130-500 km).....	7
2 Data transmisjon i HF kanalen.....	7
2.1 Doppler spredning.....	7
2.2 Flerbane forsinkelse	8
2.3 Signal til støy forholdet (SNR).....	8
3 Bredbånd på HF (MIL-STD-188-110C Vedlegg D)	9
3.1 Modulasjon.....	9
3.2 Rammestruktur	9
3.3 Koding og Interleaving.....	10
3.3.1 Koding.....	10
3.3.2 Interleaving.....	10
4 Test oppsett.....	11
4.1 Verifikasjon av måleoppsettet	12
4.2 Kanal simulator.....	12
4.3 Test lengder.....	14
4.4 Testprosedyre.....	15
4.4.1 Kalibrering	16
4.4.2 Testprosedyren for å finne grenseverdiene for kanalforholdene.....	16
5 Måleresultater	17
5.1 Sammenligning av ekstern og intern bitfeil tester	17
5.2 Resultater fra simuleringer på lab.....	18
5.2.1 Bølgeform WID 4 (MIL-STD-188-110C APPENDIX D).....	18
5.2.2 Bølgeform WID 10 (MIL-STD-188-110C APPENDIX D).....	19
5.2.3 Bølgeform WID 0 (MIL-STD-188-110C APPENDIX D).....	20
5.3 Sammenligning av lab resultater og ITU-R sine standardiserte parameterverdier.....	21
5.3.1 ITU-R Standardiserte kanal parameterverdier	21
5.3.2 Konklusjon	22

5.4	Sammenligning av lab resultater og DAMSONs måledata (Doppler And Multipath Sounding Network).....	22
5.4.1	DAMSON måleresultater	22
5.4.2	Sammenligning av bølgeformytelse med DAMSON verdier	25
5.4.3	Konklusjon	27
6	Kanaltilgjengelighet.....	28
6.1	Målesystem for å måle tilgjengelighet av HF spektrum	28
6.1.1	Perseus SDR (Microtelecom, 2009).....	28
6.1.2	Clifton Labs Antenna (Z1501D) (R.Smith, 2010).....	28
6.1.3	Programvare for datainnsamling.....	28
6.1.4	Analyse metode.....	30
6.1.5	Kanal minutt tilgjengelighet (CMA).....	30
6.1.6	CMA resultater	31
6.1.7	Oppsummering CMA	34
7	Anvendelighet av WBHF	35
7.1	Bølgeformene.....	35
7.2	Kanaltilgjengelighet.....	35
8	Videre arbeid	36
9	Lister	37
9.1	Figurliste	37
9.2	Tabelliste	37
10	Vedlegg.....	38
10.1	Vedlegg A Radio betjenings kommandoer	38
10.2	Vedlegg B Simulator betjenings kommandoer.....	38
10.3	Vedlegg C Tekniske spesifikasjoner RF-7800H-MP.....	Feil! Bokmerke er ikke definert.
11	Bibliografi	39

1 Ionosfæren og dens betydning på HF-radiobølgeutbredelse

Det ioniserte område i atmosfæren strekker seg ifra 50 km til 2000 km over jordens overflate og kalles ionosfæren. Området er delt inn i lagene D, E og F, og del-lag forekommer under gitte forhold som for eksempel F₁ og F₂ på dagtid (Figur 1 Dellag i ionosfæren).

HF radiobølger som strekker seg ifra 2 MHz til 30 MHz kan benyttes til langdistanse kommunikasjon da disse kan bli reflektert i ionosfæren. Dette gir HF egenskapen til å kommunisere med terminaler som ligger under synlig horisont (Beyond Line of Sight, BLOS).

Sett ifra et HF perspektiv kan E og F lagene ses på som reflektorer selv om det i virkeligheten er en avbøyning (Refraction).

D laget absorberer energi ifra HF bølger og forårsaker signal demping (Attenuation).

Transmisjonskanaler for HF bølgeutbredelser benytter i stor grad jordens ionosfære, og endringene i ioniseringen er den største årsaken til endringene av kanalforholdene. Det er flere årsaker til disse endringene men hovedkilden til ionisering i ionosfæren er elektromagnetisk stråling fra solen og solvind som sender elektrisk ladde partikler fra solen ((International Telecommunication Union, 1998)). Solens aktivitet kan sorteres i perioder som vinter/sommer, dag/natt og magnetiske forstyrrelser/ikke magnetiske forstyrrelser. Disse endringene er også ulike for ulike geografiske lokasjoner.

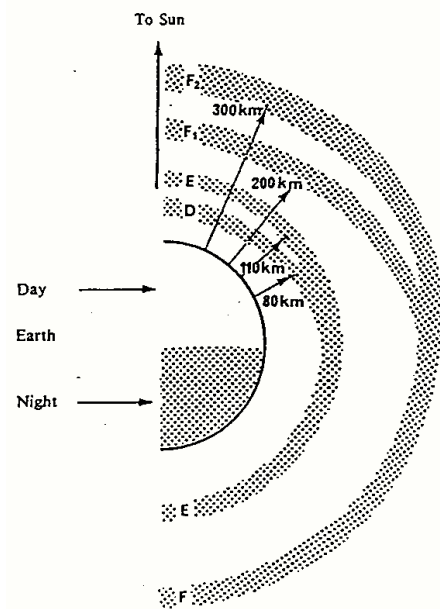
Elektrontettheten er den viktigste ionosfæreparameteren som gir HF kanalen dens egenskaper. Og tettheten i et hvert punkt i rommet til en gitt tid er avhengig av prosessene; produksjon, tap og forflytning av elektroner. Disse tre prosessene er avhengig av ulike komplekse fotokjemiske og elektrondynamiske prosesser som igjen blir påvirket av eksterne forhold i atmosfæren og magnetosfæren (Disse prosessene blir ikke videre beskrevet i denne rapporten).

1.1 D laget (50-90 km)

Elektrontettheten i D laget øker hurtig med høyde og har stor døgnlig variasjon. Størst tetthet finner sted kort tid etter klokken 12:00 lokaltid, og på nattetid er elektrontettheten veldig lav. Det er også en årsvariasjon i laget der de høyeste verdiene forekommer på sommeren. D laget har ikke sterk nok ionisering til å reflektere signalet, og det er i dette laget den største absorpsjonen av HF signaler finner sted.

1.2 E laget (90-130 km)

E laget har også sin største elektrontetthet ved lokaltid 12:00 og et års maksimum på sommeren. Ioniseringen i E laget kommer fra elektromagnetisk stråling.



Figur 1 Dellag i ionosfæren

1.2.1.1 Nordlys E

Nordlys E forårsakes av partikkel ionisering på grunn av nordlys aktivitet, og er til stede tilnærmet konstant rundt nordlysovalen. Det er et relativt tykt lag med ionisering i nord og sør og ligner det normale E-laget. Dette er av stor betydning for HF kommunikasjon da dette laget reflekterer radiobølgene, og kan forårsake rask fading og flerbane forsinkelser.

1.3 F laget (130-500 km)

Da det er ulik karakteristikk mellom øvre (200-500 km) og nedre del av laget er dette laget delt inn i F_1 og F_2 . På dagtid er F_1 , som E, sterkt påvirket av solens elektronstråling, men i nattetimene blir F_1 borte.

F_2 laget ligger øverst i ionosfæren og er til stede hele døgnet, og det er her de fleste HF refleksjonene finner sted.

2 Data transmisjon i HF kanalen

En HF kanal gjennom ionosfæren kan føre signalet under synlig horisont gjennom avbøyning i ionosfæren til en eller flere fjerntliggende mottakere. Signalet kan også avbøyes i ionosfæren og spres ved refleksjoner på jorden gjennom flere hopp før den når mottakeren. Radiofrekvens, breddegrad, tid på døgnet, årstid, solaktivitet og så videre er faktorer som påvirker denne avbøyningen og absorpsjonen som finner sted i ionosfæren. Mottatt signal i mottakeren er ofte en sammensetning av flere signaler som alle har ulike uavhengige og tidsvarierende kanal tap og fase skift. Fra dette forventes interferensutfordringer fra flerbane signaler, sterk demping og raske støyendringer som legger seg oppå den sagte varierende Signal til støy trenden.

Anvendelse av de unike mulighetene ved bruk av HF radioer krever en forståelse av utfordringene HF kommunikasjon innehar.

2.1 Doppler spredning

På samme måten som sirenen til et utrykningskjøretøy endrer frekvens ved en passering, endres radiobølgefrequensen dersom mottaker eller sender er i bevegelse. Det oppstår et Doppler skift som avhenger av frekvens og mottaker eller senders hastighet. Dersom sender beveger seg mot mottakeren vil mottatt signal $x(t)$ være gitt fra formlene:

$$x(t) = A_r e^{j2\pi f_c(t-\tau(t))} \quad \tau(t) = \frac{d_0 - vt}{c}$$

A_r = Mottatt amplitude, f_c = Bærebølgefrequensen d_0 = Avstand ved tiden $t(0)$

v = Hastighet mot mottaker

Dersom sender står i ro og mottaker beveger seg for eksempel i et bybilde, vil utsendt signal få refleksjoner i fra ulike bygninger og gi flere Doppler skiftede radiobølger inn til mottakeren. Spredningen på de ulike Doppler skiftene kalles Doppler spredning

Bybilde er ikke et typisk eksempel for HF kommunikasjon men det er det samme som skjer når radiobølgene tar ulike veier i ionosfæren, og ionosfæreforholdene endres og gir varierende lengder på signalbanene. For å kunne handtere dette i mottakeren må adaptive algoritmer i mottakeren være raskere en Doppler spredningen i kanalen.

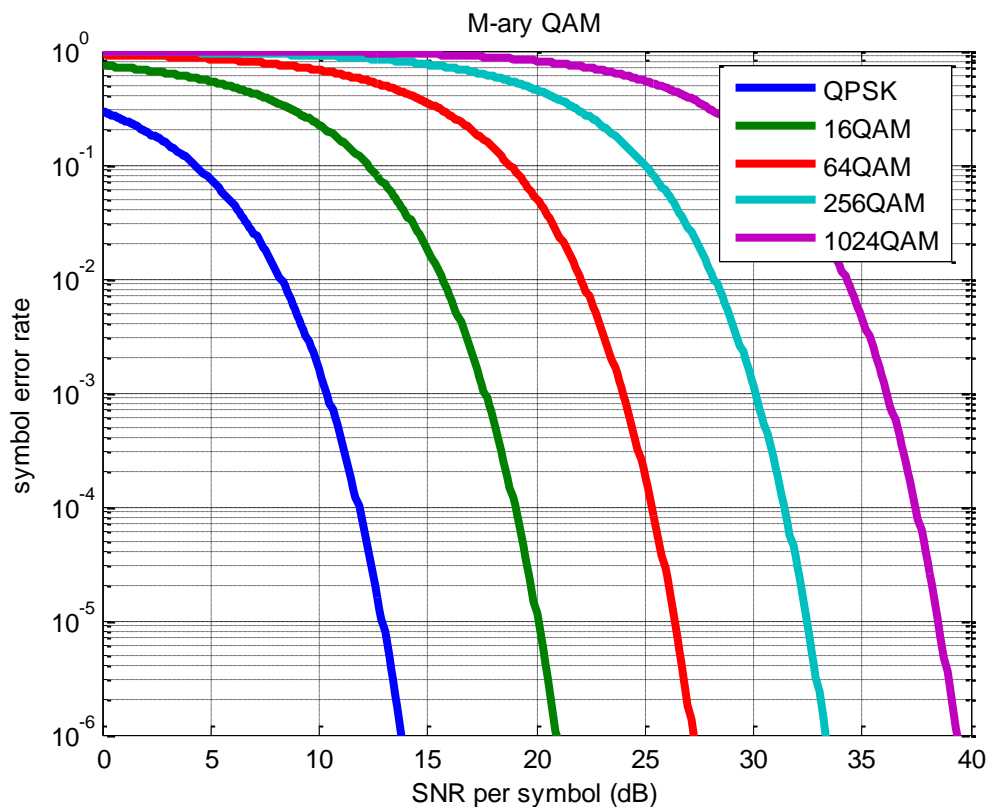
2.2 Flerbane forsinkelse

Som i eksempelet fra bybildet vil radiosignaler som tar ulike veier til mottakeren kunne få ulike lengder på kanalbanen. Dette gir en tidsdifferanse mellom signalene som går henholdsvis den lengste og korteste veien. Dette kalles flerbane forsinkelse (Multipath Delay) og kan gi inter symbol interferens.

2.3 Signal til støy forholdet (SNR)

Ulike moduleringsmetoder krever ulike forhold mellom signal og støy for å oppnå lik bitfeilrate. Figur 2 Krav til SNR nivå for ulike moduleringsformer viser hvordan kravet til SNR endres for ulike moduleringsformer. Dette gir også begrensninger for hvilke moduleringsform som kan anvendes ved ulike kanalforhold.

Dersom mottatt signal og støy registreres i et måleoppsett med en fast sendereffekt vil SNR forholdet endres i takt med endringer i kanalen. Dersom utsendt effekt økes i en stabil kanal vil også SNR forholdet i mottakeren øke, men dette endrer ikke kanalparameterne.



Figur 2 Krav til SNR nivå for ulike moduleringsformer

3 Bredbånd på HF (MIL-STD-188-110C Vedlegg D)

Vedlegg D i MIL-STD-188-110C inneholder beskrivelser av serie singeltone bølgeformer med båndbredde fra 3 kHz og opp til 24 kHz. Tabell 1 Bølgeformoversikt fra MIL-STD-188-110C viser hvilken moduleringsform som er anvendt for hver bølgeform, og hvilke datarate bølgeformene gir ved ulike båndbredder.

Tabell 1 Bølgeformoversikt fra MIL-STD-188-110C

Waveform Number	0 Walsh	1 BPSK	2 BPSK	3 BPSK	4 BPSK	5 BPSK	6 QPSK	7 8PSK	8 16QAM	9 32QAM	10 64QAM	11 64QAM	12 256QAM	13 QPSK
Bandwidth (kHz)														
3	75	150	300	600	1200	1600	3200	4800	6400	8000	9600	12000	16000	2400
6	150	300	600	1200	2400	3200	6400	9600	12800	16000	19200	24000	32000	
9	300	600	1200	2400	-	4800	9600	14400	19200	24000	28800	36000	48000	
12	300	600	1200	2400	4800	6400	12800	19200	25600	32000	38400	48000	64000	
15	300	600	1200	2400	4800	8000	16000	24000	32000	40000	48000	57600	76800	
18	600	1200	2400	4800	-	9600	19200	28800	38400	48000	57600	72000	90000	
21	300	600	1200	2400	4800	9600	19200	28800	38400	48000	57600	76800	115200	
24	600	1200	2400	4800	9600	12800	25600	38400	51200	64000	76800	96000	120000	

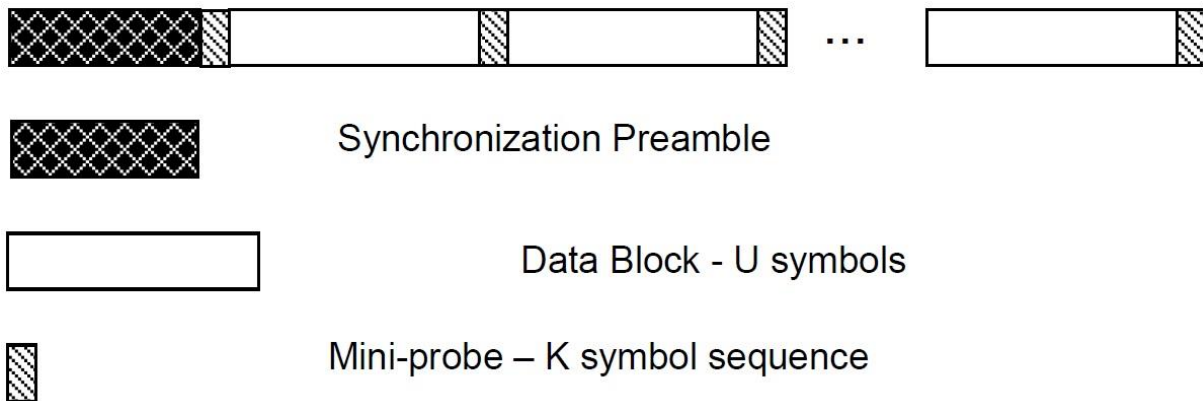
3.1 Modulasjon

Modulasjonsmetode for overføring av data symboler avhenger av valgt bølgeform, og symbolraten øker for hver båndbredde med 2400 symboler/sekund for 3 kHz båndbredde og 19 200 symboler/sekund for 24 kHz båndbredde.

Som det kommer frem fra Figur 2 Krav til SNR nivå for ulike moduleringsformer gir økende konstellasjon også økende krav til SNR.

3.2 Rammestruktur

Rammestrukturen til bølgeformene er bygd opp med en innledende preamble for synkronisering av sender og mottaker radioen.



Figur 3 Rammestruktur

Etter preamble sekvensen følger vekslende rammer med kjente (K) og ukjente (U) symboler. De kjente symbolene er miniprober som anvendes for å finne impulsresponsen til overføringskanalen, og ut i fra tiden mellom første og siste symbol i en miniprobe kan den teoretiske grensen for forsinkelse grunnet flerbane som tåles regnes ut.

$$\text{Maks teoretisk flerbane forsinkelse} = \left(\frac{\text{Antall kjente symboler i mini probe}}{2(\text{Symboler/sekund})} \right) [s]$$

Det er også mulig å finne den teoretisk maks grensen for doppler spredningen som tåles når rammestrukturen til bølgeformen er kjent.

$$\text{Maks teoretisk doppler spredning} = \left(2 \left(\frac{\text{Antall kjente symboler} + \text{ukjente symboler}}{(\text{Symboler/sekund})} \right) \right)^{-1} [Hz]$$

3.3 Koding og Interleaving

For bølgeformen i MIL-STD-188-110C skal det anvendes blokk koding, og hver kodet blokk skal interleaves i interleaverblokker med lik størrelse som kode blokkene.

3.3.1 Koding

Det benyttes en ½ rate convolution code for kjente og ukjente data som skal overføres, og for å oppnå ulike kode rater benyttes puncturing og repetiton. Tabell 2 Kode rater, viser hvilke koder som anvendes for de ulike bølgeformene.

Tabell 2 Kode rater

Waveform Number	0 Walsh	1 BPSK	2 BPSK	3 BPSK	4 BPSK	5 BPSK	6 QPSK	7 8PSK	8 16QAM	9 32QAM	10 64QAM	11 64QAM	12 256QAM	13 QPSK
3	1/2	1/8	1/4	1/3	2/3	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	8/9	8/9	9/16
6	1/2	1/8	1/4	1/3	2/3	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	8/9	8/9	
9	2/3	1/8	1/4	1/2	-	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	8/9	8/9	
12	1/2	1/8	1/4	1/3	2/3	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	8/9	8/9	
15	2/5	1/12	1/6	1/3	2/3	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	8/9	8/9	
18	2/3	1/8	1/4	1/2	-	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	8/9	5/6	
21	2/7	1/16	1/8	1/4	1/2	2/3	2/3	2/3	2/3	2/3	2/3	4/5	9/10	
24	1/2	1/8	1/4	1/3	2/3	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	8/9	5/6	

3.3.2 Interleaving

Feilopprettingskoder ville fungert best dersom forstyrrelser hadde vært normalfordelt og statistisk uavhengig, men dette er ikke tilfelle for støy i HF kanaler gjennom ionosfæren. Her kommer det haglstøy (burst) med ulik tetthet som ikke er normalfordelt og som rammer nærliggende bit.

For å kunne handtere haglstøy benyttes interleaver for å spre feilene utover, og for bølgeformen i MIL-STD-188-110C kan interleaver størrelsen velges etter kanalforholdene og typen data som skal

overføres. Med en interleaver lengde «long» på WID 10 vil hver interleaver blokk bruke 8,16 sekunder og derfor ikke være foretrukket valg for toveis datakommunikasjon, men med interleaver blokk «Ultra short» på samme bølgeform vil hver interleaver blokk bruke 128 ms, og dermed gi en redusert robusthet mot haglstøy.

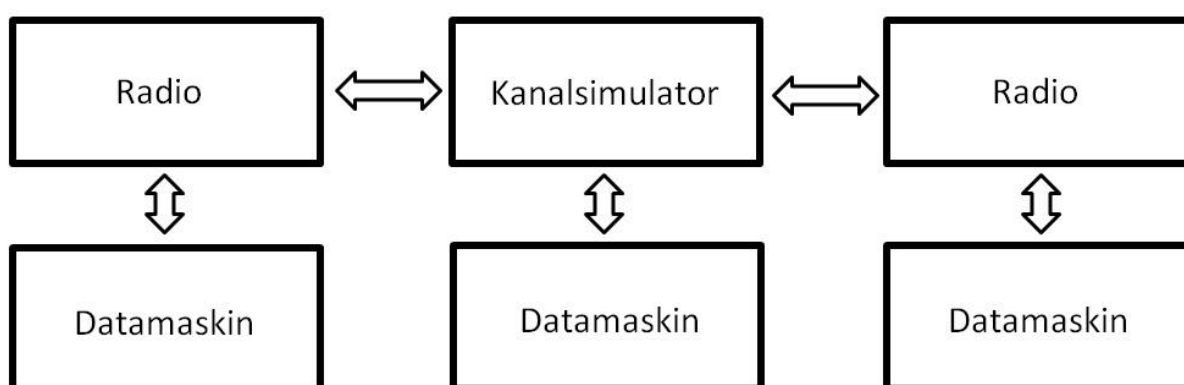
Tabell 3 Interleaver parameter

Waveform Number	UltraShort			Short			Medium			Long		
	Number of Frames	Number of bits	Number of Input Bits	Number of Frames	Number of bits	Number of Input Bits	Number of Frames	Number of bits	Number of Input Bits	Number of Frames	Number of bits	Number of Input Bits
0	-	-	-	320	640	320	1152	2304	1152	4608	9216	4608
1	4	1088	136	16	4352	544	64	17408	2176	256	69632	8704
2	4	1088	272	16	4352	1088	64	17408	4352	256	69632	17408
3	2	1632	544	8	6528	2176	32	26112	8704	128	104448	34816
4	2	1632	1088	8	6528	4352	32	26112	17408	128	104448	69632
5	1	2176	1632	4	8704	6528	16	34816	26112	64	139264	104448
6	1	4352	3264	4	17408	13056	16	69632	52224	64	278528	208896
7	1	6528	4896	4	26112	19584	16	104448	78336	64	417792	313344
8	1	8704	6528	4	34816	26112	16	139264	104448	64	557056	417792
9	1	10880	8160	4	43520	32640	16	174080	130560	64	696320	522240
10	1	13056	9792	4	52224	39168	16	208896	156672	64	835584	626688
11	1	11520	10240	4	46080	40960	16	184320	163840	64	737280	655360
12	1	15360	12800	4	61440	51200	16	245760	204800	64	983040	819200

4 Test oppsett

Modemene som anvendes til testingen er integrerte modemer i radio RF-7800H-MP produsert av Harris (Harris Corporation, 2012).

For å betjene modemene i radioene direkte var det behov for en terminal emulator. Til dette ble Tera Term valgt kjørt på eksterne datamaskiner. De eksterne datamaskinene ble koblet til radioene over nettverksprotokollen Telnet. Dette gav en god oversikt over modemets parametere og muligheten til å betjene alle parameterne i modemmet direkte. Dette gav også tilgang til å sette radioene i basisbånd modus. Figur 4 Testoppsett viser oppkoblingen av utstyret.



Figur 4 Testoppsett

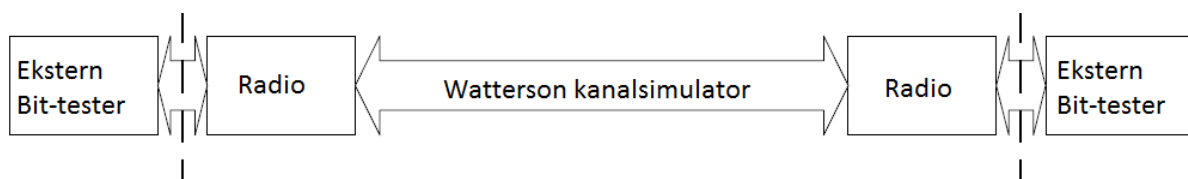
På samme måte som med radioene ble HF kanal simulatoren også betjent via en ekstern datamaskin ved anvendelse av Tera Term. Men her ble en serie RS232 oppkobling benyttet.

Radioenes basissignaler ble koblet direkte til kanalsimulatoren og justering av signalstyrke fra sender ble justert i forbindelse med kalibrering av simulatoren.

Vedlegg A og B viser betjeningskommandoene anvendt for å kontrollere radioene og kanalsimulatoren.

4.1 Verifikasjon av måleoppsettet

I denne oppgaven testes Harris sine modemer ved å anvende radioens egen innebygde bitfeil tester (BERT). Denne metoden ble valgt da dette forenklet lab arbeidet, samt at utstyret skal anvendes til felt testing i forsvaret etter avsluttet oppgave og det er da ønskelig med erfaring og kunnskap om den interne bitfeil testeren. For å kunne verifisere måleresultatene målt med den interne bitfeil testeren var det behov for å gjøre kontrollmålinger med en ekstern og uavhengig bitfeil tester. Til dette ble IFR/Marconi sin Digital Communication Analyser 2851S benyttet (benevnes IFR videre i rapporten). Figur 5 Testoppsett for verifisering av måleoppsettet viser hvordan de eksterne bitfeil testerne ble koblet til, og resultater av dette gis i seksjon 5.1.



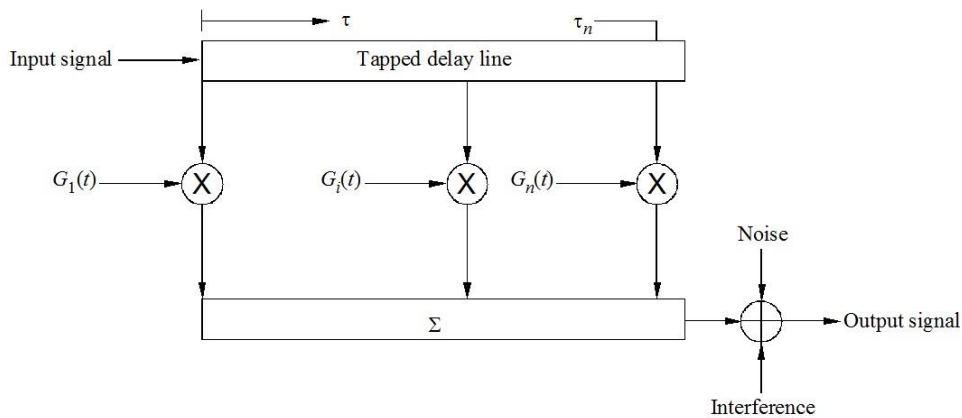
Figur 5 Testoppsett for verifisering av måleoppsettet

4.2 Kanal simulator

Arbeidet med å estimere forholdene på en HF kanal kan gjøres ved å anvende kjente prediksjonsprogram som VOACAP (Voice of America Coverage Analysis Program) og ICEPAC (Ionospheric Communications Enhanced Profile Analysis and Circuit Prediction). Dette er programmer som er nyttige verktøy i operasjonsplanlegging da de gir et estimat over hvilke forhold som kan forventes på HF kanalen som funksjon av årstider, solaktivitet, tid på døgnet og den geografiske lokasjon.

For en produsent som utvikler HF utstyr eller når egenskaper til utstyr skal testes, er det behov for en kanalsimulator som kan gi forholdene på kanalen over en kortere tidsskala. Det er behov for en modell med oppløsning ned i millisekunder på ionosfærens påvirkning på HF kanalen, og modellen som generelt blir brukt for den random varierende amplitude og fase for HF-bølger via ionosfæren (skywave) er Rayleigh fading modell (Johnson, 2013). I 1960 ble det av Watterson og hans kolleger presentert en matematisk modell som ivaretar de fleste forhold ved HF ionosfærebølger. Watterson foreslo en stasjonær modell (en «tapped delay line» basisband simulator) som estimerer den reelle kanalen over en begrenset båndbredde, og denne modellen er nå den mest brukte til testing av HF modemer. Se Figur 6 Blokk diagram over Watterson modellen.

Selv om simulatorer som implementerer denne modellen kun er et estimat og ikke oppnår en eksakt gjengivelse av den reelle kanalen har det vist seg at modemer som fungerer bra i en Watterson simulator også fungerer bra i en virkelig kanal.



Figur 6 Blokk diagram over Watterson modellen

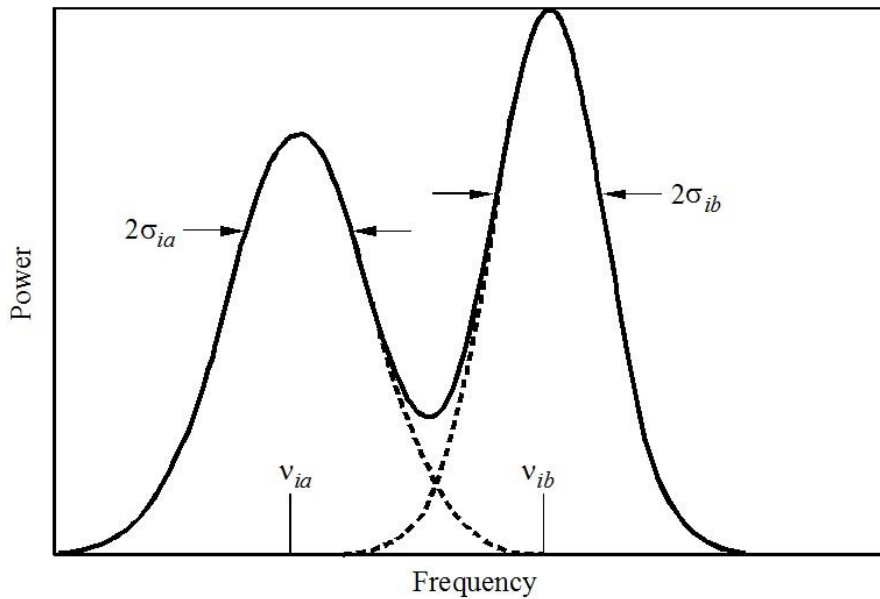
De forsinkede signalene blir modulert i amplitude og fase av en tap-gain funksjon, $G_i(t)$ og summert før støy og eventuelt interferens blir lagt til.

$$\tilde{G}_i(t) = \tilde{G}_{ia}(t) \exp(j 2\pi \nu_{ia} t) + \tilde{G}_{ib}(t) \exp(j 2\pi \nu_{ib} t)$$

Hver tap-gain funksjon har et effekt spektrum $f_i(\nu)$ som består av summen av to magneto-ionic komponenter, som begge er en gaussisk funksjon av frekvens, ν .

$$f_i(\nu) = \frac{1}{\tilde{A}_{ia} \sigma_{ia} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\nu - \nu_{ia})^2}{2\sigma_{ia}^2}\right] + \frac{1}{\tilde{A}_{ib} \sigma_{ib} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\nu - \nu_{ib})^2}{2\sigma_{ib}^2}\right]$$

Figur 7 Effektspekteret til "tap-gain" funksjonen viser den gaussiske fordelingen.



Figur 7 Effektspekteret til "tap-gain" funksjonen

I anvendelsen av Watterson kanalsimulator til testing av HF modemer blir modellen forenklet til å behandle et signal som går over to kanaler med likt midlet signaltap. Amplituden varierer uavhengig i kanalene som følge av fading med en felles Gaussisk spektraltetthet, og forsinkelsen mellom kanalene er konstant i hver simulering. På utgangen av simulatoren blir det lagt til hvit gaussisk støy (AWGN).

For å sette opp ønskede kanaler er det tre parameter som må settes:

- Tidsforsinkelsen mellom hver kanal (Multipath Time Delay)
- Båndbredden på fading prosessen (Doppler Spread)
- Signal til støy forhold (SNR)

I arbeid med å teste HF modemer er det viktig at modemer som skal sammenlignes blir målt over like simulator modeller med like parameter. ITU-R har standardisert parameterverdier som definerer ulike kanaler på ulike geografiske områder (International Telecommunication Union, 1998).

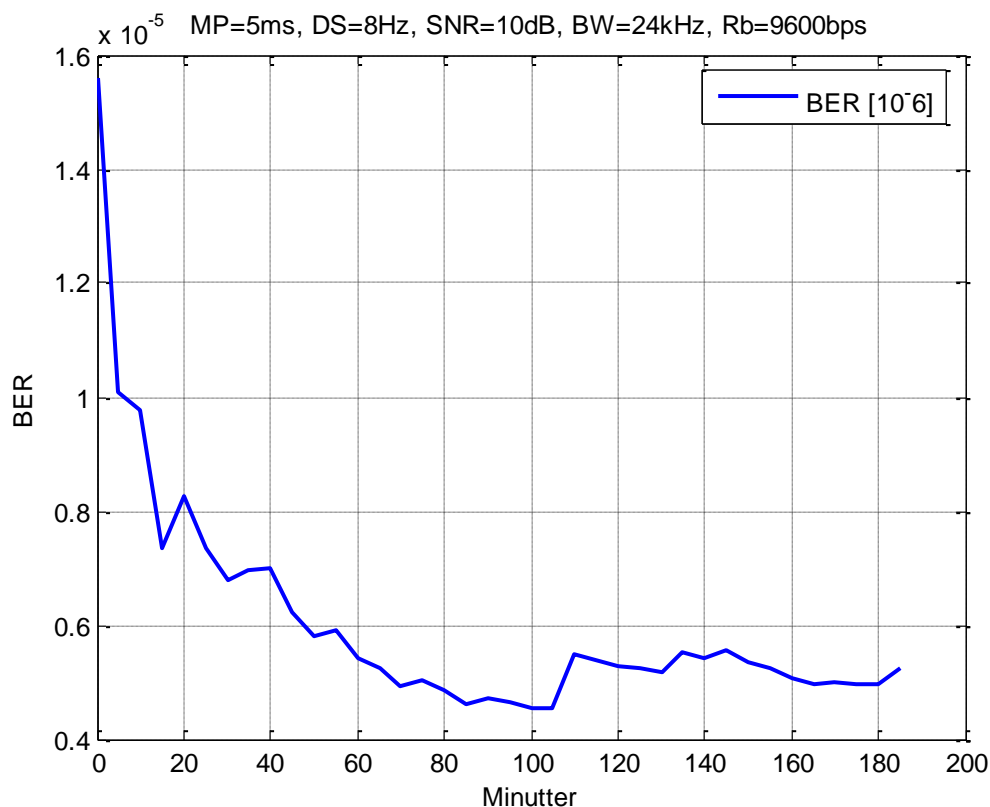
4.3 Test lengder

Lengde på en simulering avhenger av doppler spredningen, dataraten og hvilken BER (Binary Error Rate) som skal måles. Den internasjonale telekommunikasjons union har satt opp to ligninger for utregning av test lengde og anbefaler å bruke den som gir den lengste tiden (International Telecommunication Union, 1998). Formlene fra ITU er

$$t = \frac{3000}{\text{Dopler spredningen}} \quad \text{og} \quad t = \frac{100}{\text{BER} * \text{data raten}}$$

Her måles tiden i sekunder og formelen som gir den lengste tiden skal anvendes.

Figur 8 Viser medgått tid før resultater stabiliseres, og denne målingen stemmer godt overens med formelen der BER inngår som en parameter. Selv om kurven stemmer bra med denne var erfaringen generelt at testtiden måtte utvides for at resultatet skulle være stabilt. Alle måleresultater i denne rapporten er derfor et resultat av en test tid på over 5 timer på hver test.



Figur 8 Viser medgått tid før resultater stabiliseres

I følge ITU er den anbefalt tiden for denne testen 348 minutter om BER= 0,5E-6 legges inn i formelen. Målet med målingene var å finne begrensningene til radioens bølgeformer, og kravet var en BER på 1E-5. Målinger der resultatet ble en BER bedre enn 1E-5 ble ikke prioritert å kjøre full tid, men alle målingene med resultater rundt 1E-5 ble kjørt i opptil fem ganger ITU sine anbefalinger for å sikre korrekt avlesning.

4.4 Testprosedyre

Siden tidsforbruket på en test er stort, og det er mange bølgeformer, måtte noen få bølgeformer velges ut for testing. Bølgeformene WID 0 (Walsh), WID 4 (BPSK) og WID 10 (64QAM) ble valgt testet med båndbredde på 24kHz. Det er kun testet overføringer med lang interleaver da det er egenskapene ved yttergrensene som skal testes.

WID 0 er valgt da dette er bølgeformen med best gjennomtrengningsegenskaper under dårlige kanalforhold. WID 10 er bølgeformen med høyest data rate som er designet for kommunikasjon via ionosfæren (Johnson, 2013), og WID 4 ble valgt da denne har egenskaper som ligger mellom WID 0 og WID 10.

Tabell 4 Parameter for utvalgte bølgeformer

Kanal ID	WID 0	WID 4	WID 10
Symbol rate (Symbol/sekund)	19 200	19 200	19 200
Data rate (bps)	600	9 600	76 800
Kode rate	1/2	2/3	3/4
Modulasjon	Walsh	BPSK	64QAM
Ukjente symboler i rammestrukturen	N/A	816	2176
Kjente symboler i ramme strukturen	N/A	272	272

4.4.1 Kalibrering

Basisbånd signalnivå i fra radioen kalibreres mot kanal simulatoren ved oppstart av radioens innebygde bitfeiltester og etter endring av parameterne flerbaneforsinkelse og dopler spredning (Det er ikke nødvendig å kalibrere dersom det kun er SNR nivået som endres).

4.4.2 Testprosedyren for å finne grenseverdiene for kanalforholdene

Målet med testen er å finne grenseverdiene på kanalparameterne flerbaneforsinkelse, dopplerspredning og SNR der bølgeformen som blir testet gir en BER lik 1E-5.

1. **Still inn radioenes modemer med ønskede parametere**
2. **Still inn kanalsimulatoren med ønskede start parametere**

Finn først grenseverdiene til hver enkel parameter ved å sette parameterne som ikke testes til trygg verdi (MP=0,5 ms, DS=0,5Hz,SNR=50).

3. **Start testen og kjør i nødvendig tid**
4. **Resultatet registreres og ønskede endringer av kanalparametere endres**
5. **Testen startes på nytt og resultatet registreres**

3-5 gjentas til alle grenseverdiene er funnet.

Etter at hver enkelt grenseverdi var funnet ble simulatorparameterne MP og DS satt til funnet grenseverdi for å finne SNR kravet for bølgeformen under disse forholdene.

5 Måleresultater

Målet har vært å finne ut hvilke kanalforhold som bredbandsradioen klarer å transmittere nytte­data over. Hvilken overførings­hastighet er det realistisk for en bruker å kunne forvente at de nye bølgeformene kan gi.

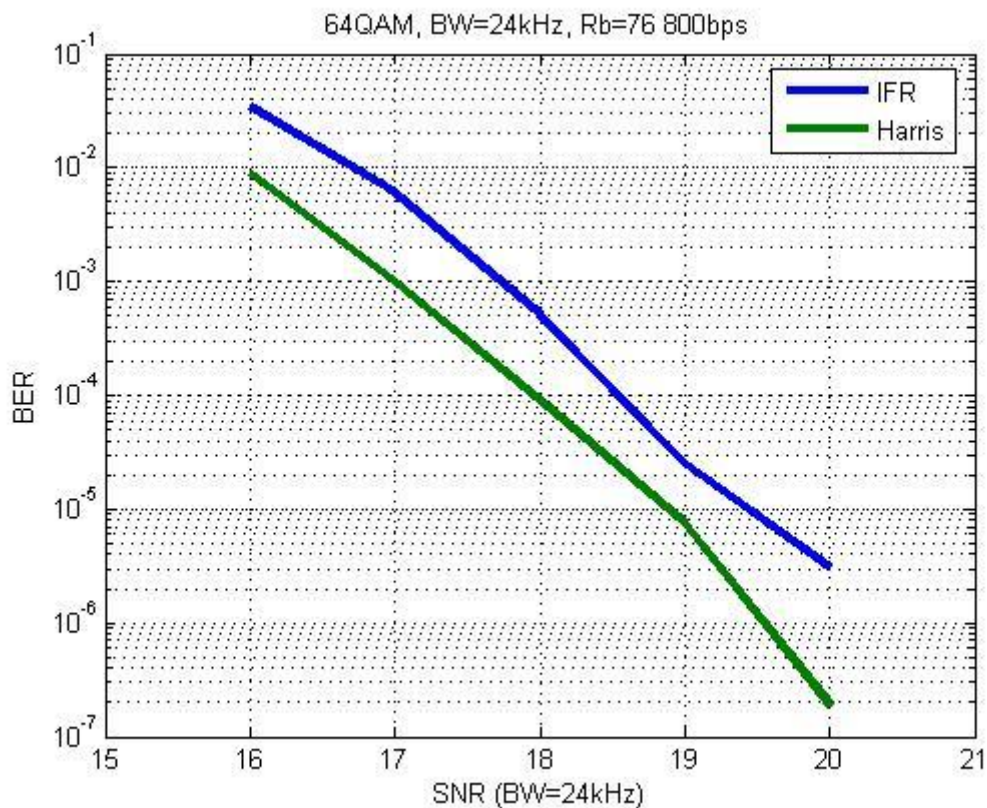
Alle måleresultatene ble registrert i en matrise, og Figur 10 Måleresultater for bølgeform WID 4 og Figur 11 Måleresultater for bølgeform WID 10 ble generert fra en slik matrisen.

Samtidig med denne BER målingen ble verdiene for en PER (Package Error Rate) på $1E-3$ registrert. Pakkestørrelsen ble satt til 1000 bit. Ved å sammenligne grenseverdiene som ble funnet ble det funnet at innenfor en toleranse på ± 5 dB SNR ble grenseverdiene for doppler spredningen og flerbane­forsinkelsen de samme for $BER=1E-5$ og $PER=1E-3$. Kurvene for PER resultatene ville derfor vært tilnærmet identiske med figurene som viser BER resultatene og blir derfor ikke vist i denne rapporten.

5.1 Sammenligning av ekstern og intern bitfeil tester.

Det første resultatet går på verifikasjon av måleoppsettet som beskrevet i seksjon 4.1.

Figur 9 Sammenligning av ekstern og interne bitfeil tester over en AWGN kanal viser at det er en tilnærmet likhet mellom resultatene målt med IFR testerene og radioens interne bitfeil tester. Som figuren viser er det i underkant av 1 dB avvik mellom testerne for hver BER verdi.



Figur 9 Sammenligning av ekstern og interne bitfeil tester over en AWGN kanal

5.2 Resultater fra simuleringer på lab

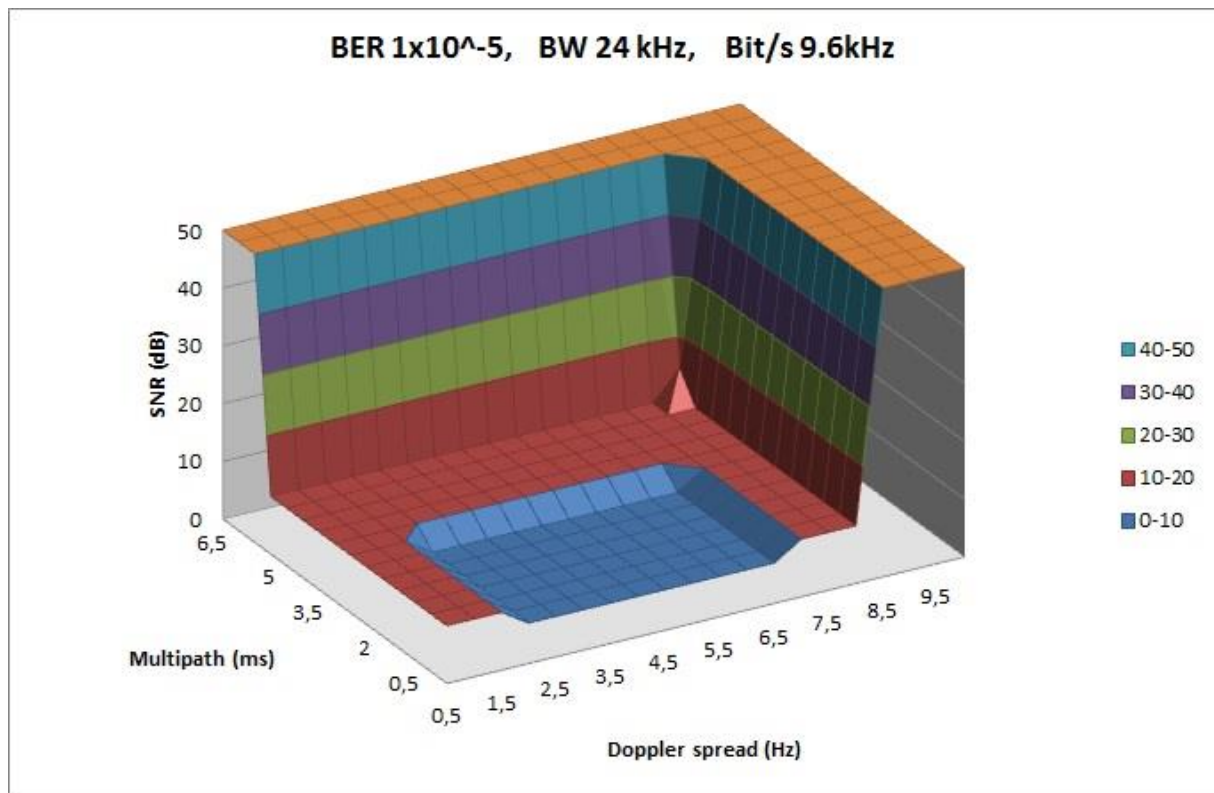
De neste resultatene viser grenseverdier for de utvalgte bølgeformene.

5.2.1 Bølgeform WID 4 (MIL-STD-188-110C APPENDIX D)

Den første bølgeformen som ble testet var bølgeform WID 4 fra MIL-STD-188-110C APPENDIX D. Denne anvender BPSK modulering og har en dataoverføring på 9600 bit/s ved en båndbredde på 24 kHz. Figur 10 Måleresultater for bølgeform WID 4 viser grenseverdiene for doppler spredning, flerbaneforsinkelse og påkrevde SNR verdier. Verdiene innenfor «badekaret» er verdier der feilraten er bedre enn kravet på $1E-5$.

Som et eksempel kan en lese fra figuren at en doppler spredning på 4,5 Hz og en flerbane forsinkelse på 2 ms vil kreve et SNR forhold over mellom 0 og 10 dB for å oppnå en BER på $1E-5$ (målt SNR 7 dB).

Yttergrensene for WID 4 ble funnet til 6,0 ms flerbane forsinkelse og 8,0 Hz Dopplerspredning.



Figur 10 Måleresultater for bølgeform WID 4

Antall kjente symboler i miniproben for bølgeform WID 4 er 272 symboler. Dette gir en teoretisk toleranse på flerbane forsinkelse på 7,08 ms (Multipath delay). Med 816 data symboler for WID 4 blir den teoretisk maks grensen for dopplerspredning 8,82 Hz.

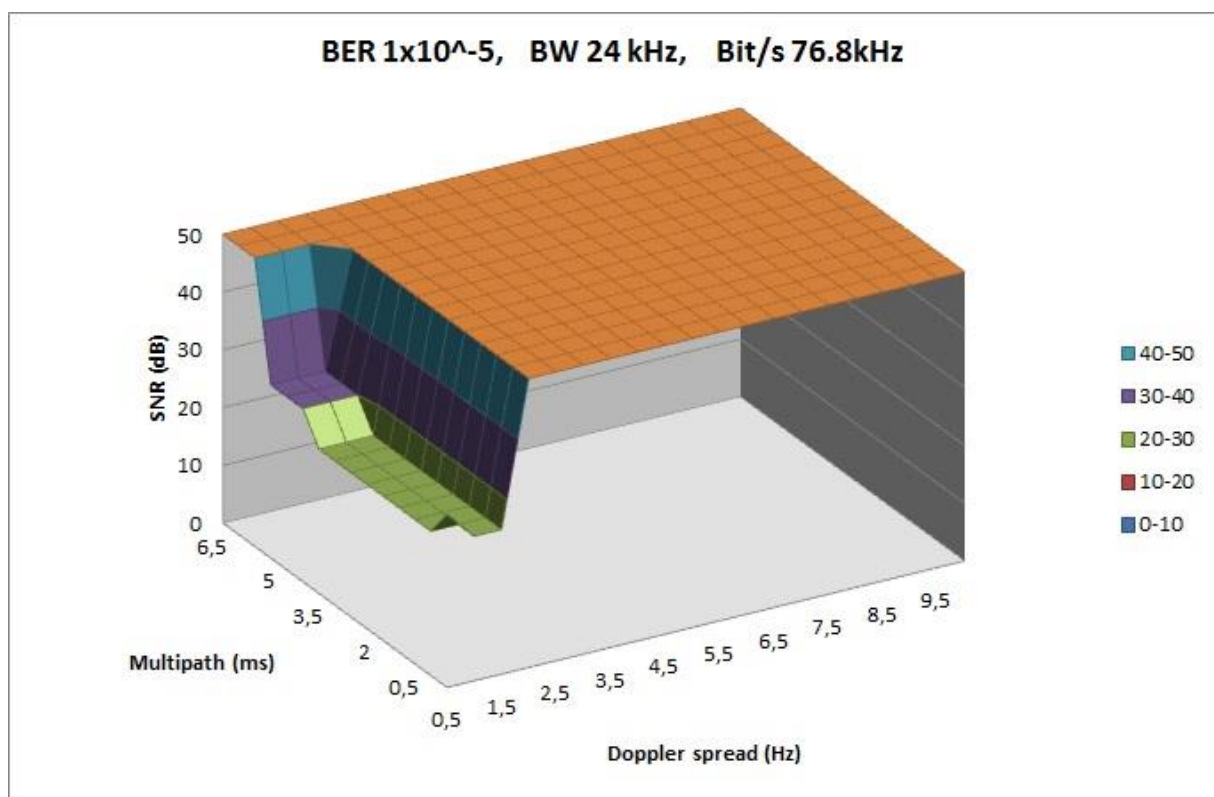
Det målte verdiene ligger nært de beregnede verdiene.

5.2.2 Bølgeform WID 10 (MIL-STD-188-110C APPENDIX D)

Den andre bølgeformen som ble testet var WID 10. Denne anvender 64QAM og har en dataoverføring på 76 800 bps ved en båndbredde på 24 kHz. Figur 11 Måleresultater for bølgeform WID 10 viser at denne bølgeformen har lavere grenseverdi når det gjelder dopplerspredningen og SNR forholdet, men at grenseverdien for flerbanefforsinkelsen er uendret. Også her er verdiene innenfor «badekaret» verdier der feilraten er bedre enn kravet på $1E-5$.

Med eksempelet fra bølgeform WID 4 kan en lese fra figuren at denne bølgeformen ikke vil trenge gjennom en kanal med en dopplerspredning på 4,5 Hz og en flerbanefforsinkelse på 2 ms. Bølgeformen takler flerbanefforsinkelsen men dopplerspredningen blir for bred.

Yttergrensene for WID 10 ble funnet til 6,0 ms flerbanefforsinkelse og 1,5 Hz Dopplerspredning.



Figur 11 Måleresultater for bølgeform WID 10

Antall kjente symboler i miniprobe for bølgeform WID 10 er lik WID 4 med 272 symboler. Dette gir en toleranse teoretisk flerbanefforsinkelse på 7,08 ms (Multipath delay).

Med 2176 data symboler for WID 10 blir den teoretisk maksimumsgrensen for doppler spredning 3,92 Hz for WID 10.

Målt flerbanefforsinkelse ligger nært den beregnede verdien, men her ligger den målte doppler spredningen under halvparten av den teoretiske.

5.2.3 Bølgeform WID 0 (MIL-STD-188-110C APPENDIX D)

Den siste bølgeformen som ble testet var WID 0 fra MIL-STD-188-110C APPENDIX D. Dette er en robust bærebølge med en dataoverføring på 600 bps, ved en båndbredde på 24 kHz, som er designet for å trenge gjennom ekstreme kommunikasjonsforhold. Denne bølgeformen ble testet på ITU (International Telecommunication Union, 1998) sin definisjon på en kanal på nordlige breddegrader med dårlige forhold (High Latitude Disturbed Condition).

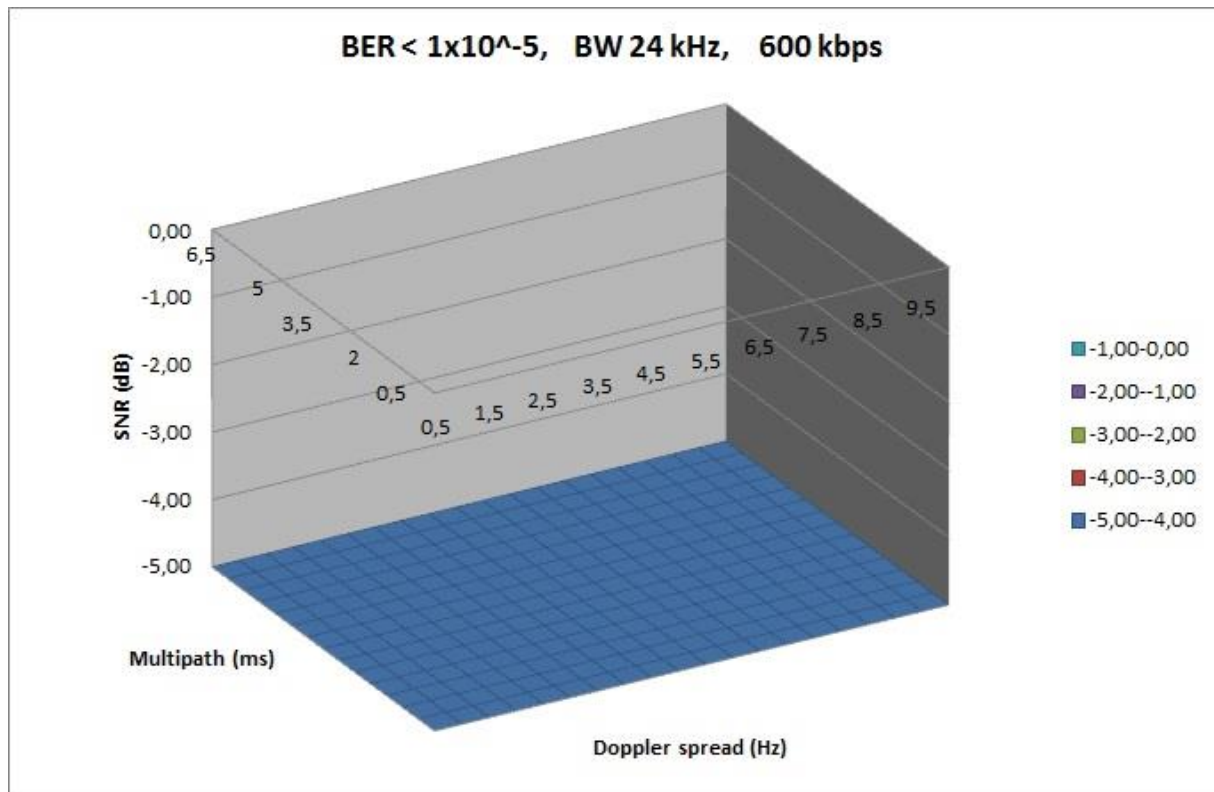
Kanal forholdene er definert slik:

Flerbane forsinkelse = 7 ms Doppler spredning = 30 Hz

Tabell 5 Resultater fra WID 0 over en HLDC kanal

SNR	-5,5 dB	-5,0 dB	-4,5 dB
BER	4,3 E-5	8,2 E-6	2,2 E-6
PER (1000 bit)	8,9 E-3	2,6 E-3	5,7 E-4

Resultatene fra WID 0 viser at bølgeformen har god gjennomtrengnings egenskap selv om kanalforholdene er svært dårlige. Testen viser også at bølgeformen fungerer bra selv under negative SNR forhold, og Figur 12 Måleresultater for bølgeform WID 0 viser også styrken til denne bølgeformen.



Figur 12 Måleresultater for bølgeform WID 0

5.3 Sammenligning av lab resultater og ITU-R sine standardiserte parameterverdier

For at modemer skal kunne testes og sammenlignes er det behov et sett med kanalparametere som alle aktører kan anvende. Slike parametere er definert av ITU-R.

5.3.1 ITU-R Standardiserte kanal parameterverdier

De standardiserte parameterverdier er fordelt på ulike geografiske områder, og disse er lave, middels og høye breddegrader. Tabell 6 ITU-R sine standardisert kanalparameter viser hvilke parameterverdier som definerer de ulike forholdene på de ulike breddegrader.

Tabell 6 ITU-R sine standardisert kanalparameter

Latitudes	Condition	Multipath delay	Dopler spread
Low latitudes < 30 ⁰	Quiet condition	0,5 ms	0,5 Hz
	Moderate condition	2,0 ms	1,5 Hz
	Disturbed condition	6,0 ms	10,0 Hz
Mid latitudes 30 ⁰ - 60 ⁰	Quiet condition	0,5 ms	0,1 Hz
	Moderate condition	1,0 ms	0,5 Hz
	Disturbed condition	2,0 ms	1,0 Hz
High latitudes > 60 ⁰	Quiet condition	1,0 ms	0,5 Hz
	Moderate condition	3,0 ms	10,0 Hz
	Disturbed condition	7,0 ms	30,0 Hz

5.3.1.1 Low latitudes

For området «Low latitude» er det kun kanalforhold med forstyrrelser (Disturbed) som har definerte parametere som ligger utenfor funnet grenseverdier for bølgeformene som ble testet. Og bølgeformene vil kunne benyttes med gode resultater for kanaler med moderat støy. Når det gjelder dopplerspredningen for kanaler med forstyrrelser ligger denne utenfor grenseverdiene til både WID 4 og WID 10 og disse bølgeformene kan derfor ikke forventes anvendt under disse forholdene (Disturbed) i denne regionen (Low latitude).

5.3.1.2 Mid latitudes

De enkleste parameterne å sammenligne med er parameterne for «Mid latitude». Her ligger all kanalparameterne innenfor funnet grenseverdier for bredbåndsbølgeformene og anvendeligheten av bølgeformene forventes er svært god i denne regionen.

5.3.1.3 High latitudes

I det mest aktuelle område for denne oppgaven, «High latitudes» ligger både WID 4 og WID 10 sine grenseverdier utenfor ITU-R sine kanaldefinisjoner på kanaler med moderat støy. Innenfor disse forholdene kan det ikke forventes en anvendelighet av disse bredbåndsbølgeformen. I følge ITU-R sine definisjoner på kanalforholdene i nordområdene vil bølgeformene kun forventes anvendt ved gode kanalforhold (Quiet).

Bølgeformen WID 0 vil ikke ha problemer med å trenge gjennom noen av de definerte kanalparameterne.

5.3.2 Konklusjon

Ved sammenligning av målte resultater med ITU-R sine kanal definisjoner vil det kun være under forhold med lite støy «Quiet» at det kan forventes anvendelighet av bredbåndsbølgeformene med høy datarate i nordområdene.

5.4 Sammenligning av lab resultater og DAMSONs måledata (Doppler And Multipath Sounding Network)

Da denne oppgaven skal forsøke å besvare i hvilken grad utstyr med teknologi for bredbåndkommunikasjon over HF kanaler er anvendelig på de nordlige breddegrader, er det behov for måledata på kanaler fra nordområdene.

5.4.1 DAMSON måleresultater

I perioden fra april til desember i 1995 ble det foretatt kanal målinger i nordområdene (DAMSON målinger (Matthew J. Angling, 33)) som gir grunnlag for å svare på dette. Tabell 7 Damson målekanaler, viser over hvilke strekninger det ble foretatt målinger.

Tabell 7 Damson målekanaler

Senderstasjon	Mottakerstasjon	Strekning	Avstand, km
Svalbard	Tuentangen	S - T	2019
Svalbard	Kiruna (Sverige)	S - K	1158
Harstad	Tuentangen	H - T	1019
Harstad	Kiruna (Sverige)	H - K	194

DAMSON resultatene bygger på antall mottatte signaler og ikke antall sendte.

Disse målekanalene i nordområde gir informasjon om forholdene i en kanal som går langs lengdegradene, en kanal langs breddegradene og to kanaler som krysser både lengdegrader og breddegrader.

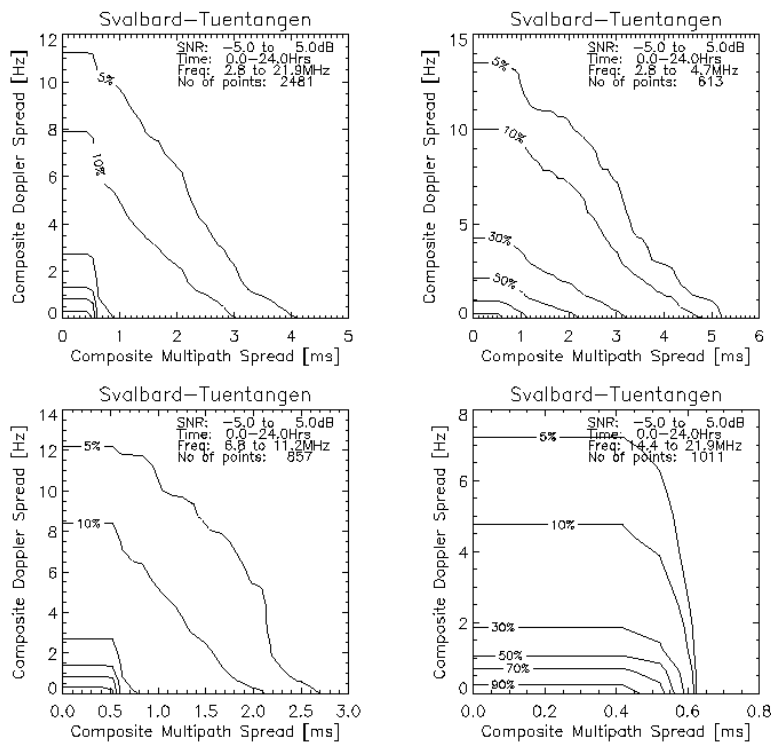
Nordlysovalen spiller en viktig rolle for kanalforholdene i nord, og dette gjenspeiles i hvordan DAMSON målingene er oppdelt i ettertids. Oppdelingen som ble valgt er 0000-2400 UTC og 1900-0100 UTC, og her er den sistnevnte perioden lik 2100-0300 CGMLT(Correct GeoMagnetic Local Time) som er perioden da nordlysovalen forventes i sin sørligste posisjon og dermed tiden der størst forstyrrelse er ventet på de respektive baner

Det er også av dette av interesse å finne kanalegenskaper for ulike frekvenser. DAMSON målingene ble delt i frekvensgrupper og Tabell 8 DAMSON frekvensgrupper viser disse grupperingene.

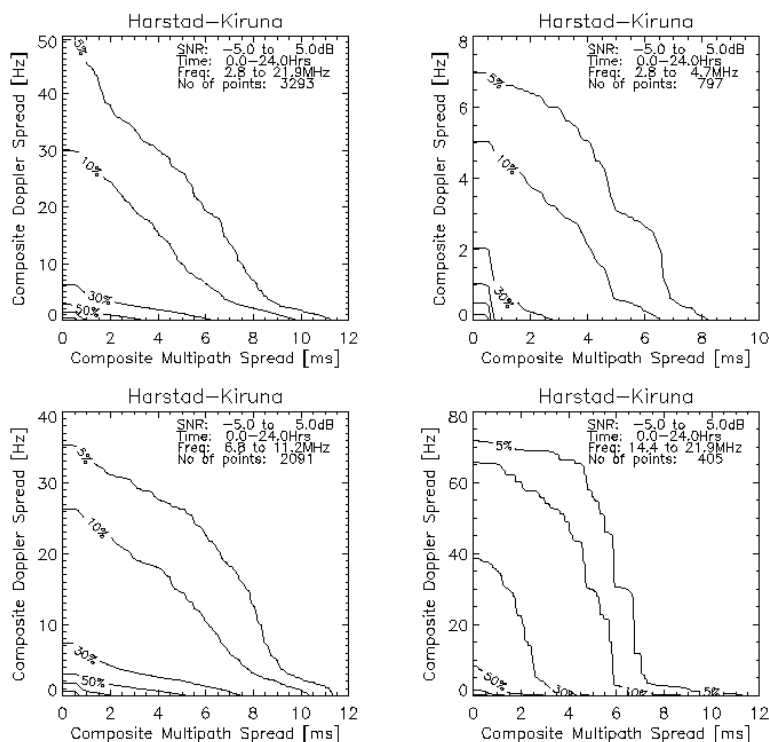
Tabell 8 DAMSON frekvensgrupper

Frekvens f_1 [MHz]		Frekvens f_2 [MHz]
Alle frekvenser		
2,8	-	4,7
6,8	-	11,2
14,4	-	21,9

Watterson modellen for HF kanalen som er anvendt i denne oppgaven simulerer en gaussisk fordelt doppler spredning der verdien representerer bredden ved 68 % av effektspekteret (2σ). I måledataene fra DAMSON er definisjonen av doppler spredningen gitt ved 80 % av effektspekteret. For å kunne sammenligne disse to må DAMSON dataene multipliseres med 0,78.



Figur 13 Grafisk fremstilte måleresultater Svalbard – Tuentangen (DAMSON)



Figur 14 Grafisk fremstilte måleresultater Harstad - Kiruna (DAMSON)

Figur 13 Grafisk fremstilte måleresultater Svalbard – Tuentangen (DAMSON) og Figur 14 Grafisk fremstilte måleresultater Harstad - Kiruna (DAMSON) viser et eksempel på hvordan måleresultatene fra DAMSON er gjengitt. Den øverste kurven i hvert plot viser resultater der det er 5 % sannsynlighet for at målte verdier er større enn kurveverdiene. Dette betyr at det for målte resultater er 95 % sannsynlighet for at forholdene er bedre enn dette i en tilsvarende måleperiode.

Data fra DAMSON som blir brukt som grunnlag for sammenligning videre i rapporten er data fra denne 5 % sannsynlighetsterskelen.

For å kunne sammenligne måleresultater utført på laboratoriet i forbindelse med denne oppgaven er måleresultatene fra DAMSON der 5 % linjen skjærer aksene multiplisert med en faktor 0,78 og gjengitt i Tabell 9 Måleresultater 5% linjen (DAMSON) og Tabell 10 Måleresultater 5 % linjen (DAMSON)

Tabell 9 Måleresultater 5% linjen (DAMSON)

Strekning			S - T	S - K	H - T	H - K
Flerbane forsinkelse [ms]	00-24 UTC	Alle frekvenser	3,20	3,59	3,12	8,74
		2.8-4.7MHz	4,06	4,45	3,43	6,40
		6.8-11.2MHz	2,11	2,42	2,89	8,81
		14.4-21.9MHz	0,47	1,33	0,70	8,89
	19-01 UTC	Alle frekvenser	2,73	3,28	2,96	7,02
		2.8-4.7MHz	3,43	3,67	2,73	6,08
		6.8-11.2MHz	1,64	2,42	3,90	7,49
		14.4-21.9MHz	0,47	3,20	1,25	5,77

Tabell 10 Måleresultater 5 % linjen (DAMSON)

Strekning			S - T	S - K	H - T	H - K
Dopler spredning [Hz]	00-24 UTC	Alle frekvenser	8,58	12,48	2,34	38,61
		2.8-4.7MHz	10,53	8,97	1,56	5,46
		6.8-11.2MHz	9,36	10,53	4,29	27,30
		14.4-21.9MHz	5,46	18,72	2,34	56,94
	19-01 UTC	Alle frekvenser	8,97	12,09	4,68	44,46
		2.8-4.7MHz	10,14	7,02	2,34	7,41
		6.8-11.2MHz	7,80	8,58	11,31	39,00
		14.4-21.9MHz	7,41	21,06	3,12	53,04

5.4.2 Sammenligning av bølgeformytelse med DAMSON verdier

Sammenligning av funnet grenseverdier for bølgeformene med faktisk målte data.

5.4.2.1 WID 4

Med unntak av kanalen fra Harstad til Kiruna vil denne bølgeformens toleranse for flerbane forsinkelse håndtere alle målte DAMSON verdier av kanalforholdene i nordområdene. Når det gjelder kanalen mellom Harstad og Kiruna vil det ut ifra DAMSONS målte verdier ikke kunne forventes 95 % tilgjengelighet på strekk tilsvarende dette over hele frekvensspekteret. Men for frekvensområdet fra 2,8 MHz til 4,7 MHz kan det forventes en tilgjengelighet opp mot 95 % også her i forhold til flerbane verdiene.

Når det gjelder dopplerspredningen så viser Tabell 10 Måleresultater 5 % linjen (DAMSON) at spredningen ligger over 8 Hz for over halvparten av målingene, og at det også her er kanalen mellom Harstad og Kiruna som har de høyeste kanalparameterne. Sammenligningene viser at det kan forventes en god tilgjengelighet på kanaler som strekker seg nord-sør i dette området ved bruk av bølgeform WID 4, men at tilgjengeligheten ikke kan forventes å være 95 % i kanaler som strekker seg øst-vest.

Figur 13 Grafisk fremstilte måleresultater Svalbard – Tuentangen (DAMSON) viser at dersom kravet til tilgjengelighet senkes til 90 % så kan det forventes god tilgjengelighet ved anvendelse av bølgeform WID 4 i fra Svalbard til Tuentangen i tilsvarende periode. For at kanalen mellom Harstad og Kiruna skal kunne defineres som tilgjengelig så må kravet til tilgjengelighet senkes til 70 %. (Se Figur 14 Grafisk fremstilte måleresultater Harstad - Kiruna (DAMSON) for detaljer).

5.4.2.2 WID 10

Ettersom grenseverdien for flerbane-forsinkelsen for denne bølgeformen er lik WID 4 så vil ikke denne bølgeformen kreve andre forhold i kanalen og konklusjonene er de samme for denne bølgeformen.

For dopplerspredningen er det annerledes. Grenseverdien for denne bølgeformen ble på laboratoriet funnet til å være 1,5 Hz og det er ikke målt så lav spredning over noen av DAMSON kanalene ved krav om en tilgjengelighet på 95 %.

For å anvende denne bølgeformen på nordlige breddegrader så må kravet om tilgjengelighet senkes til 70 % på kanaler tilsvarende Svalbard – Tuentangen, og under 50 % tilgjengelighet for kanaler tilsvarende Harstad – Kiruna.

5.4.2.3 WID 0

Grenseverdiene til denne bølgeformen ble ikke forsøkt funnet på laboratoriet, og det kan antas at denne bølgeformen fungerer under dårligere forhold enn en flerbane-forsinkelse på 7 ms og en dopplerspredning på 30 Hz. (High Latitude Disturbed Condition) definert av ITU-R.

Med unntak av frekvensene over 6,8 MHz på kanalen mellom Harstad og Kiruna har alle måleresultatene fra Damson en flerbane-forsinkelse mindre en 7 ms, og det er også kun mellom Harstad og Kiruna at dopplerspredningen er målt over 30 Hz. Figur 14 Grafisk fremstilte måleresultater Harstad - Kiruna (DAMSON) viser at dersom kravet til tilgjengelighet senkes til 90 % så er det kun for frekvenser over 14,4 at doppler spredninger overstiger 30 Hz.

5.4.3 Konklusjon

Bølgeform WID 0 er anvendbar for nordområdene og det kan forventes en generelt høy tilgjengelighet over hele frekvensområde.

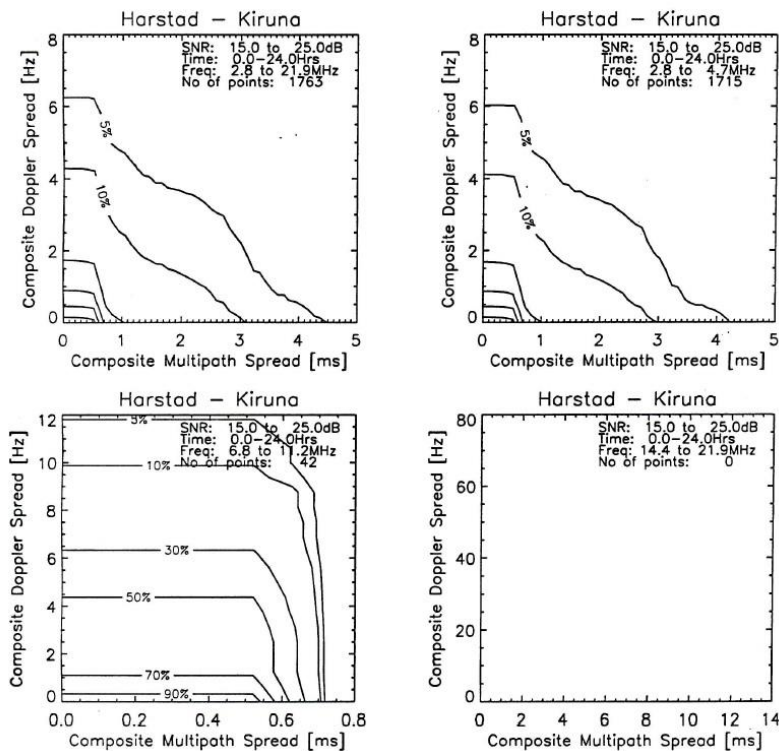
Bølgeform WID 4 er anvendbar for nordområdene og det kan forventes en generell tilgjengelighet på 90-95 % på de lave frekvensene og en tilgjengelighet 70-90% på de høye frekvensene.

Bølgeform WID 10 er også anvendbar for nordområdene, men det kan ikke forventes en høy grad av tilgjengelighet. For frekvenser opp til 4,7 MHz kan det forventes en generell tilgjengelighet på under 70 % og for frekvenser over 4,7 MHz kan det forventes en generell tilgjengelighet under 50 %.

Det understrekes her at disse sammenligningene er gjort mot DAMSON måleresultater der testoppsettet gav en målt SNR fra -5 dB til 5 dB i testmottakeren. Det ble også gjort målinger der SNR nivået ble målt fra 15 dB til 25 dB, og selv for «problem» kanalen Harstad Kiruna viser Figur 15 Grafisk fremstilte måleresultater Harstad - Kiruna (DAMSON) 15-25 dB at målte verdier for flerbanespredningen og dopplerspredningen er vesentlig lavere når kanalforholdene bedres. Dette samsvarer med kanaldefinisjonene til ITU-R og vil resultere i en større tilgjengelighet en beskrevet når forholdene er bedre.

For å finne hvilke kanalforhold som kan forventes på kanalen må prediksjonsprogram som ICEPAC anvendes.

(Det er valgt å legge ved resultatplott fra DAMSON for tiden 0000-2400 UTC da det er disse plottene som innehar de høyeste verdiene).



Figur 15 Grafisk fremstilte måleresultater Harstad - Kiruna (DAMSON) 15-25 dB

6 Kanaltilgjengelighet

Ettersom det frem til 2011 tradisjonelt sett kun har vært anvendt båndbredder opp til 3 kHz er det knyttet usikkerhet rundt spørsmålet om et signal som anvender 24 kHz kontinuerlig båndbredde vil være mulig å finne ledig spektrum til. Medforfattere av MIL-STD-188-110C fra Harris Corporation har utarbeidet et system med hardware og software for å måle i hvilken grad en 24 kHz kanal er tilgjengelig. Målinger er blitt gjort i USA og Storbritannia men ikke på våre nordligere breddegrader.

Under Nordic Shortwave Conferance 2013 på Fårö i Sverige presenterte Harris sine resultater og målemetoder som var blitt anvendt i USA og Storbritannia. Foreleserne opplyste at det ville være mulig for andre å få informasjon for å anskaffe nødvendig utstyr og software for å foreta tilgjengelighetsmålinger i ønsket området. FFI (Forsvarets Forsknings Institutt) tok kontakt med Harris, og januar 2014 var måleutstyr og software anskaffet FFI-Kjeller.

6.1 Målesystem for å måle tilgjengelighet av HF spektrum

Målesystemet måler eksisterende trafikk på hele HF bandet over 24 timer. Systemet sampler energien innenfor en målebredde på 1 MHz, og starter på 2,5 Mhz. Deretter endres måle området til 3,5 MHz og trinnvis videre opp til 29,5 MHz. Her er det mulig å velge måletiden pr målebredde samt gjentakelseshastigheten. Målingene i rapporten er gjort med 1 sekunds måle tid pr målebredde og 60 sekunder mellom hver gjentakelse. Slik måler system hele HF bandet hvert minutt, med et sekund måletid pr MHz.

For best å kunne ivareta den totale HF trafikken ble det brukt en rundt strålende antenne. Denne måler jordbølger og bølger som kommer inn ifra ionosfæren med lav vinkel.

6.1.1 Perseus SDR (Microtelecom, 2009)

Utfordringen med å måle båndbredden på 1 MHz ble løst ved å anvende en Perseus SDR fra Microtelecom. Denne har de nødvendige egenskapene for å kunne tilpasse målingene til stedets signalenergi (Dempning, filtrering og en lav støy forsterker) og til å overføre målingene til en PC.

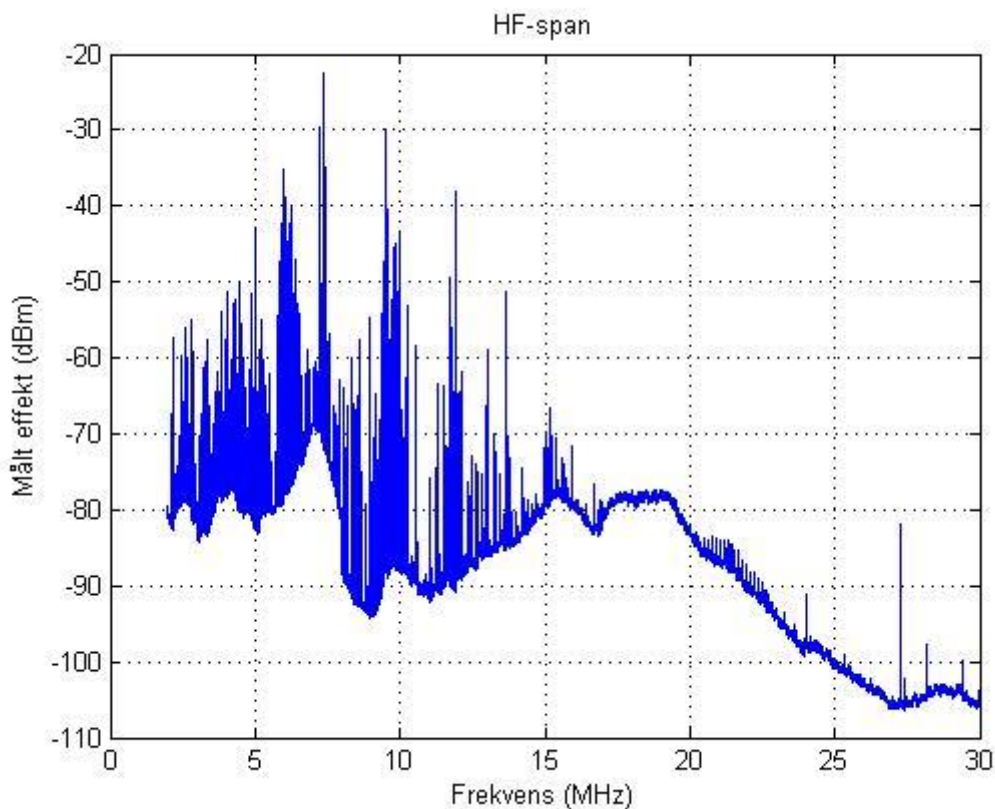
6.1.2 Clifton Labs Antenna (Z1501D) (R.Smith, 2010)

Pisk antennen, som er en 3 meter aktiv pisk antenne, ble valgt blant annet fordi den er lett å transportere og monterings vennlig. For at tilgjengelighets målinger utført fra ulike aktører skal kunne sammenlignes er det lagt vekt på bruk av likt utstyr.

Dette er ikke en robust antenne og dette skapte utfordringer for målinger i vindutsatte områder. Fordelen med antenne er at det er en aktiv antenne som gir en høy-impedanse-felteffekt transistor inngang. En effektiv kobling fra en fysisk liten antenne til en lav impedans last (50 Ohm).

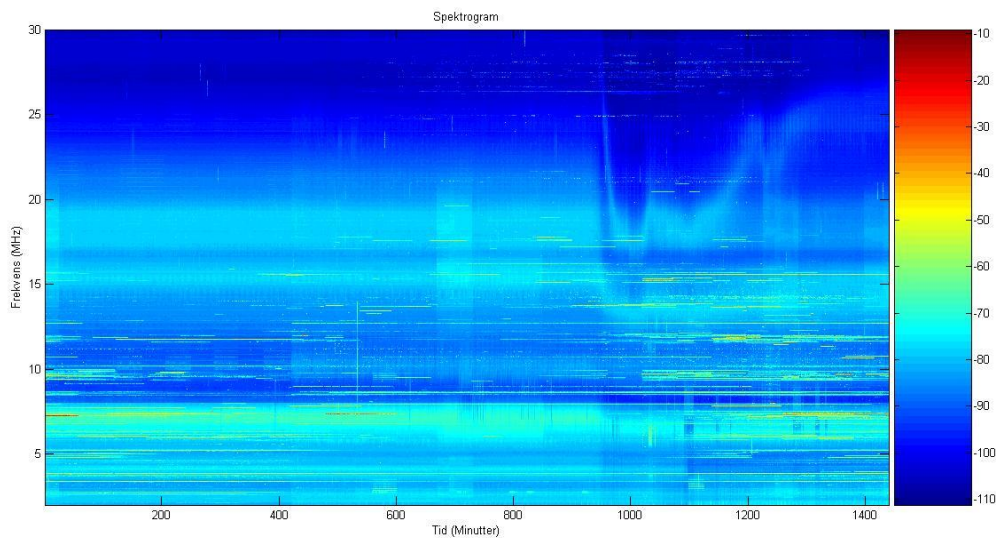
6.1.3 Programvare for datainnsamling

Programvaren for innsamling av data er utviklet av Harris Corporation ved hjelp av Software Developers Kit fra Microtelecom. Programvaren skanner hele HF båndet i steg på 1MHz fra 2,5 MHz til 29,5 MHz. For hvert steg blir det samlet data med en samplingsrate på 2MHz i 1 sekund. Dette gir komplekse måledata (IQ) som blir multiplisert med et Kaiser vindu og transformert i en 4096 punkts FFT som gir en frekvens oppløsning på 488,28125 Hz. For hver bin blir det foretatt 488 målinger og det er en midling av disse som gir effektnivået for hver bin. En runde med innhenting av måledata fra 2MHz til 30MHz gir en datafil med 57344 verdier som representerer effekten målt over HF båndet i et gitt minutt. Se Figur 16 Måleverdier fra Hønefoss 5.april klokken 02:00 som viser et måleminutt.



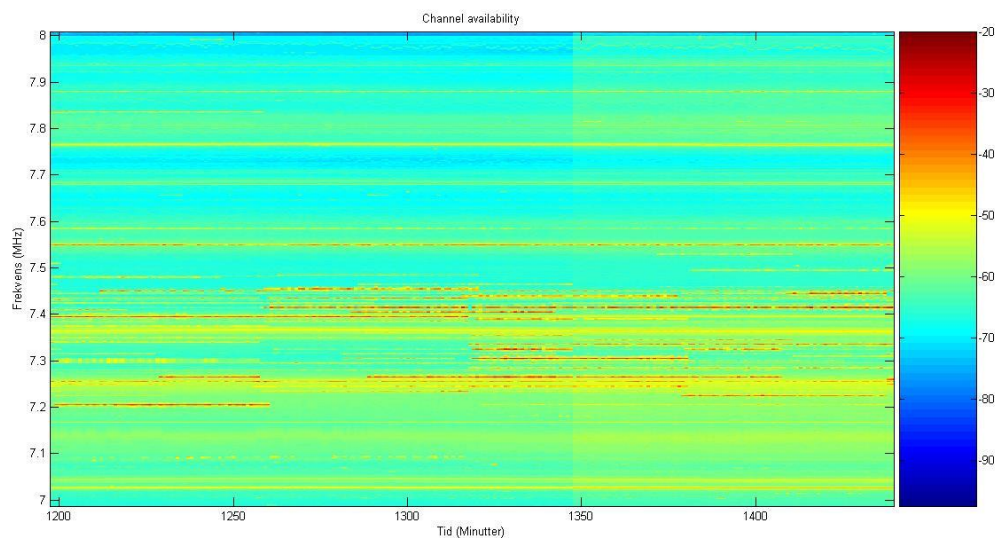
Figur 16 Måleverdier fra Hønefoss 5.april klokken 02:00

I alle utførte målinger ble det samlet inn data hvert minutt i 24 timer (0:00-23:59), og dette gav en matrise med måledata på 1440 x 57344. Figur 17 HF-Spektrogram fra Hønefoss 4.april 2014 (Effekt i dBm) viser målte verdier for et døgn.



Figur 17 HF-Spektrogram fra Hønefoss 4.april 2014 (Effekt i dBm)

For å få et inntrykk av oppløsningen i matrisen er et utsnitt gjengitt i Figur 18 Utsnitt fra HF-Spektrogram fra Hønefoss 5.april 2014 (Effekt i dBm). Og her kan en se at flere av frekvensene fra 7 til 8 MHz er i bruk i målt periode.



Figur 18 Utsnitt fra HF-Spektrogram fra Hønefoss 5.april 2014 (Effekt i dBm)

6.1.4 Analyse metode

Hvert måleminutt ble først omgjort til effekt per 3kHz bredde. Dette ble gjort ved å summere energien fra hver bin for hver 3kHz, og der en bin ble tilhørende to 3kHz segmenter ble energien linjert fordelt. Støygulvet ble definert ved å midle segmentene med de ti laveste verdiene innenfor hver 3 kHz.

En terskel ble så definert 10 dB over støygulvet. 3kHz segmenter med energi over denne terskelen ble definert utilgjengelig og gitt verdien 0, og segmenter med energi mellom støygulvet og terskelen ble definert som tilgjengelig og gitt verdien 1. Dette gav en tilgjengelighetsvektor pr minutt med 9334 ($28\text{MHz}/3\text{kHz}=9334$) verdier som ble brukt videre til å definere tilgjengeligheten for 3,12 og 24 kHz kanaler.

6.1.5 Kanal minutt tilgjengelighet (CMA)

Den metriske definisjonene CMA (Channel Minutte Availability) ble gitt for å gi en indikasjon på hvor mye båndbredde som er tilgjengelig uten å ta hensyn til kanalfordeling og oppdrag (William N.Furman, 2013).

For at en kanal skal bli definert som tilgjengelig, må båndbredden være tilgjengelig i to minutter eller mer. Dette betyr at de representative verdiene i tilgjengelighetsvektoren må ha verdien 1 for gitt frekvens og båndbredde i minimum tre påfølgende målinger for å bli definert som tilgjengelig.

I hver 1 MHz blokk er det 333 3kHz blokker. For en time blir dette 19980 kanal tilgjengelighetsverdier (333×60), og om en time har 73% av de 19980 verdiene lik 1 så betyr dette at den aktuelle 1MHz blokken er 73 % tilgjengelig for en 3 kHz kanal.

1	0,79	0,38	0,60	0,74	0,22	0,82	0,82	0,83	0,70	0,79	0,60	0,81	0,89	0,88	0,93	0,92	0,47	0,98	0,95	0,94	0,91	0,99	0,95	0,99	0,88	0,79	0,92	0,98
2	0,77	0,36	0,55	0,70	0,21	0,80	0,80	0,84	0,69	0,78	0,61	0,81	0,90	0,88	0,93	0,92	0,46	0,98	0,95	0,93	0,90	0,99	0,95	0,99	0,88	0,78	0,92	0,98
3	0,77	0,34	0,54	0,73	0,19	0,82	0,81	0,83	0,67	0,80	0,61	0,81	0,91	0,86	0,93	0,92	0,46	0,98	0,95	0,93	0,90	0,99	0,95	0,99	0,88	0,80	0,92	0,98
4	0,77	0,35	0,55	0,75	0,20	0,82	0,82	0,84	0,68	0,77	0,62	0,82	0,90	0,88	0,93	0,92	0,45	0,98	0,95	0,93	0,90	0,99	0,95	0,99	0,88	0,81	0,92	0,98
5	0,77	0,36	0,58	0,76	0,21	0,80	0,84	0,88	0,65	0,79	0,59	0,81	0,86	0,85	0,93	0,91	0,45	0,98	0,95	0,93	0,90	0,99	0,95	0,99	0,89	0,79	0,92	0,98
6	0,79	0,39	0,61	0,75	0,22	0,77	0,84	0,94	0,69	0,77	0,60	0,78	0,88	0,78	0,91	0,87	0,45	0,98	0,95	0,92	0,90	0,99	0,95	0,99	0,88	0,80	0,92	0,98
7	0,79	0,39	0,60	0,73	0,21	0,80	0,84	0,92	0,69	0,76	0,58	0,78	0,83	0,76	0,92	0,82	0,44	0,98	0,95	0,90	0,90	0,99	0,95	0,99	0,89	0,80	0,92	0,98
8	0,79	0,40	0,60	0,74	0,20	0,77	0,83	0,92	0,78	0,76	0,55	0,80	0,85	0,76	0,88	0,77	0,48	0,98	0,94	0,90	0,90	0,98	0,94	0,98	0,89	0,79	0,92	0,98
9	0,78	0,40	0,59	0,74	0,20	0,74	0,87	0,94	0,79	0,78	0,55	0,79	0,84	0,80	0,90	0,82	0,53	0,97	0,94	0,91	0,90	0,97	0,93	0,98	0,89	0,82	0,92	0,98
10	0,79	0,39	0,60	0,75	0,20	0,73	0,88	0,97	0,80	0,82	0,54	0,80	0,87	0,78	0,90	0,85	0,57	0,96	0,95	0,91	0,90	0,98	0,92	0,98	0,89	0,82	0,92	0,99
11	0,79	0,40	0,60	0,75	0,20	0,79	0,89	0,97	0,81	0,79	0,53	0,80	0,88	0,80	0,90	0,83	0,59	0,97	0,95	0,90	0,90	0,98	0,92	0,99	0,89	0,82	0,92	0,99
12	0,79	0,40	0,59	0,76	0,20	0,75	0,89	0,97	0,82	0,78	0,50	0,78	0,86	0,80	0,90	0,80	0,61	0,97	0,94	0,90	0,90	0,99	0,92	0,99	0,89	0,82	0,92	0,99
13	0,79	0,40	0,59	0,75	0,19	0,75	0,85	0,96	0,83	0,75	0,50	0,76	0,86	0,79	0,91	0,82	0,58	0,97	0,93	0,90	0,90	0,98	0,93	0,99	0,89	0,82	0,92	0,99
14	0,80	0,40	0,60	0,76	0,19	0,75	0,83	0,92	0,85	0,71	0,51	0,74	0,87	0,76	0,93	0,79	0,57	0,96	0,93	0,86	0,88	0,98	0,93	0,99	0,90	0,83	0,91	0,98
15	0,79	0,41	0,60	0,75	0,19	0,79	0,86	0,86	0,87	0,67	0,52	0,73	0,86	0,72	0,92	0,78	0,56	0,95	0,94	0,87	0,89	0,98	0,93	0,99	0,89	0,80	0,91	0,98
16	0,77	0,41	0,60	0,79	0,19	0,74	0,92	0,81	0,87	0,64	0,48	0,76	0,86	0,70	0,92	0,80	0,56	0,95	0,94	0,88	0,91	0,99	0,92	0,99	0,89	0,78	0,91	0,98
17	0,77	0,40	0,59	0,80	0,23	0,75	0,92	0,71	0,85	0,64	0,49	0,71	0,86	0,63	0,93	0,83	0,54	0,95	0,94	0,90	0,91	0,99	0,91	0,99	0,89	0,78	0,91	0,98
18	0,77	0,38	0,56	0,78	0,26	0,74	0,91	0,71	0,84	0,66	0,50	0,72	0,86	0,68	0,93	0,86	0,56	0,95	0,94	0,92	0,91	0,97	0,94	0,98	0,90	0,78	0,92	0,98
19	0,78	0,38	0,50	0,74	0,24	0,73	0,86	0,86	0,87	0,67	0,52	0,73	0,85	0,74	0,92	0,83	0,52	0,98	0,94	0,91	0,91	0,99	0,94	0,99	0,90	0,75	0,92	0,98
20	0,79	0,36	0,60	0,75	0,21	0,73	0,92	0,69	0,83	0,68	0,52	0,73	0,88	0,76	0,95	0,86	0,56	0,98	0,95	0,94	0,92	0,99	0,95	0,99	0,91	0,76	0,92	0,98
21	0,79	0,36	0,59	0,77	0,34	0,68	0,93	0,69	0,85	0,65	0,53	0,76	0,89	0,80	0,95	0,89	0,58	0,98	0,95	0,95	0,92	0,99	0,95	0,99	0,92	0,77	0,92	0,98
22	0,79	0,40	0,53	0,79	0,38	0,66	0,82	0,74	0,87	0,75	0,55	0,77	0,90	0,88	0,96	0,88	0,70	0,98	0,96	0,97	0,86	0,97	0,95	0,99	0,91	0,82	0,91	0,98
23	0,78	0,45	0,50	0,74	0,30	0,73	0,76	0,82	0,89	0,80	0,57	0,76	0,91	0,92	0,96	0,90	0,78	0,98	0,96	0,98	0,81	0,95	0,96	1,00	0,90	0,89	0,91	0,98
24	0,78	0,37	0,58	0,70	0,24	0,78	0,82	0,80	0,70	0,76	0,61	0,81	0,89	0,87	0,93	0,92	0,48	0,98	0,95	0,94	0,90	0,98	0,95	0,99	0,88	0,75	0,92	0,98
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	

Figur 22 CMA Vadsø 4.april 3kHz båndbredde

Målinger i Vadsø viser en forholdsvis god tilgjengelighet på kanaler med 3 kHz båndbredde.

1	0,73	0,30	0,49	0,60	0,17	0,73	0,76	0,72	0,63	0,62	0,43	0,65	0,75	0,78	0,85	0,83	0,35	0,96	0,87	0,90	0,77	0,98	0,87	0,98	0,78	0,70	0,86	0,98
2	0,71	0,27	0,43	0,54	0,13	0,71	0,74	0,72	0,62	0,62	0,44	0,61	0,78	0,76	0,85	0,82	0,34	0,96	0,87	0,90	0,76	0,98	0,87	0,98	0,78	0,70	0,86	0,98
3	0,68	0,28	0,42	0,58	0,14	0,74	0,76	0,67	0,60	0,65	0,45	0,65	0,77	0,75	0,85	0,82	0,34	0,95	0,87	0,89	0,75	0,98	0,87	0,98	0,78	0,71	0,86	0,98
4	0,69	0,26	0,42	0,59	0,13	0,75	0,76	0,69	0,60	0,63	0,45	0,65	0,75	0,74	0,85	0,81	0,34	0,96	0,87	0,89	0,75	0,98	0,87	0,98	0,79	0,73	0,86	0,98
5	0,71	0,27	0,47	0,62	0,16	0,70	0,79	0,75	0,56	0,63	0,43	0,64	0,70	0,70	0,85	0,78	0,33	0,96	0,87	0,89	0,76	0,98	0,87	0,98	0,79	0,72	0,86	0,98
6	0,72	0,30	0,50	0,64	0,18	0,70	0,80	0,87	0,61	0,61	0,43	0,61	0,74	0,59	0,83	0,73	0,33	0,96	0,87	0,86	0,76	0,98	0,87	0,98	0,78	0,72	0,86	0,98
7	0,73	0,31	0,50	0,60	0,18	0,73	0,81	0,85	0,62	0,58	0,40	0,59	0,67	0,57	0,83	0,63	0,31	0,96	0,87	0,84	0,75	0,98	0,88	0,98	0,79	0,73	0,86	0,98
8	0,71	0,32	0,48	0,62	0,16	0,69	0,80	0,86	0,70	0,56	0,42	0,62	0,72	0,59	0,76	0,57	0,33	0,96	0,86	0,83	0,75	0,97	0,87	0,97	0,78	0,71	0,86	0,98
9	0,69	0,32	0,48	0,64	0,17	0,67	0,84	0,90	0,73	0,59	0,42	0,59	0,70	0,61	0,80	0,65	0,38	0,96	0,86	0,85	0,76	0,95	0,85	0,97	0,78	0,74	0,85	0,98
10	0,69	0,31	0,48	0,64	0,16	0,67	0,85	0,94	0,74	0,65	0,41	0,63	0,73	0,60	0,80	0,71	0,42	0,93	0,86	0,86	0,75	0,96	0,85	0,96	0,78	0,73	0,84	0,99
11	0,70	0,32	0,47	0,66	0,16	0,65	0,86	0,93	0,73	0,60	0,40	0,63	0,74	0,62	0,81	0,67	0,45	0,94	0,86	0,84	0,78	0,96	0,84	0,97	0,77	0,74	0,85	0,99
12	0,70	0,32	0,46	0,66	0,15	0,67	0,86	0,94	0,76	0,57	0,37	0,58	0,72	0,62	0,80	0,63	0,47	0,94	0,86	0,83	0,78	0,97	0,84	0,97	0,77	0,73	0,85	0,99
13	0,69	0,33	0,47	0,64	0,13	0,68	0,81	0,92	0,78	0,53	0,35	0,56	0,72	0,61	0,82	0,67	0,44	0,95	0,84	0,83	0,77	0,96	0,85	0,98	0,79	0,73	0,85	0,99
14	0,73	0,34	0,51	0,65	0,19	0,70	0,79	0,84	0,79	0,52	0,35	0,54	0,73	0,58	0,85	0,62	0,43	0,94	0,83	0,76	0,74	0,97	0,85	0,98	0,81	0,74	0,85	0,98
15	0,72	0,35	0,51	0,64	0,14	0,67	0,82	0,72	0,80	0,50	0,36	0,55	0,71	0,53	0,83	0,61	0,42	0,91	0,85	0,78	0,75	0,97	0,84	0,98	0,78	0,69	0,83	0,97
16	0,69	0,34	0,50	0,66	0,15	0,68	0,87	0,62	0,81	0,47	0,33	0,55	0,70	0,50	0,82	0,63	0,41	0,92	0,86	0,80	0,79	0,97	0,85	0,97	0,78	0,68	0,84	0,97
17	0,70	0,31	0,48	0,68	0,18	0,68	0,88	0,47	0,79	0,49	0,34	0,53	0,71	0,45	0,84	0,68	0,38	0,92	0,87	0,84	0,80	0,98	0,83	0,97	0,79	0,70	0,84	0,97
18	0,70	0,29	0,46	0,65	0,16	0,64	0,85	0,50	0,78	0,53	0,34	0,53	0,71	0,52	0,85	0,70	0,40	0,92	0,87	0,85	0,79	0,95	0,86	0,97	0,81	0,69	0,85	0,97
19	0,71	0,29	0,45	0,63	0,17	0,62	0,85	0,50	0,77	0,48	0,36	0,53	0,71	0,57	0,84	0,70	0,37	0,95	0,87	0,84	0,79	0,98	0,87	0,98	0,81	0,66	0,86	0,97
20	0,72	0,26	0,45	0,61	0,14	0,61	0,86	0,54	0,75	0,51	0,36	0,55	0,75	0,59	0,87	0,75	0,41	0,96	0,89	0,89	0,80	0,98	0,88	0,98	0,82	0,69	0,86	0,97
21	0,71	0,26	0,47	0,63	0,23	0,56	0,86	0,56	0,77	0,49	0,39	0,57	0,75	0,63	0,87	0,77	0,43	0,96	0,88	0,91	0,80	0,98	0,86	0,98	0,84	0,69	0,86	0,97
22	0,70	0,29	0,40	0,64	0,28	0,55	0,74	0,60	0,80	0,58	0,41	0,60	0															

Tilgjengeligheten på HF kanaler som anvender en båndbredde på 24 kHz konkluderes tilgjengelig i Hønefoss regionen. (Frekvens rettigheter til ulike brukere er ikke tatt med i dette arbeidet men vil være en overordna faktor som påvirker tilgjengeligheten).

Ut ifra måleresultatene fra Vadsø kan det ikke konkluderes med god tilgjengelighet på HF kanaler som anvender 24 kHz båndbredde.

Ved å benytte direktive antenner forventes økt tilgjengelighet av bredbåndskanaler.

7 Anvendelighet av WBHF

7.1 Bølgeformene

Bredbåndsteknologi med modemer som støtter bredbåndsbølgeformene definert i vedlegg D til MIL-STD-188-110C er testet og grenseverdier for utvalgte bølgeformer ble funnet. Sammenligning av disse grenseverdiene med kjente kanalparameter for nordområdene viser at bredbåndsbølgeformer for HF generelt er anvendelige for nordområdene.

Når det gjelder bølgeformer for høye datarater vil det likevel være redusert anvendelighet ved bruk av høye HF frekvenser, og spesielt i kanaler lik strekket Harstad – Kiruna.

Det kan forventes en meget god tilgang på overføringer med en datarate på 600 bps selv i perioder med svært dårlige forhold i nord. Det kan også forventes god tilgang på overføringer med en datarate opp til 9 600 bps under normale forhold i nordområdene.

For datarater opp mot 76 800 bps må det forventes en lavere tilgang, og det vil være viktigere med en god kanalplanlegging for å finne kanalene som gir nødvendige kanalparameter for en slik overføring. Men i perioder med gode forhold vil også bølgeformer med datarater til 76 800 bps kunne forventes anvendt i nordområdene.

For å finne anvendeligheten for konkrete kanalstrekk for et konkret tidsrom må det anvendes et prediksjonsprogram for å kunne estimere kanalforholdene mer presist for aktuell kanal, og slik finne hvilke bølgeformer som forventes anvendelige.

7.2 Kanaltilgjengelighet

Ut ifra målinger i Hønefoss konkluderes det med at det er plass til bredbåndsbølgeformer som anvender båndbredder opp til 24 kHz. Måleresultatene fra Vadsø viser uventa lav tilgang på bølgeformer med bred båndbredde, men som nevnt under seksjon 6.1.7 mistenkes det at disse målingene ikke gir et korrekt bilde over situasjonen i nord.

8 Videre arbeid

For å kunne verifisere anvendeligheten av bredbåndsbølgeformen ytterligere vil det være nyttig å kjøre lignende tester som er utført i denne oppgaven over den virkelige HF-kanalen. Det vil også være interessant å teste bølgeformene i jordbølgekommunikasjon med fartøy ute på havet. Her forventes bedre kanalforhold og mulighet til å oppnå datarater over 76 800 bps.

Det vil også være aktuelt å finne grenseverdiene for bølgeformene ved anvendelse av en «Ultra Short» interleaver setting for anvendelse av toveis datakommunikasjon.

Nye målinger for å finne kanaltilgjengeligheten (CMA) bør utføres i Vadsø, og gjerne i andre nordliggende områder for å kunne verifisere målte resultater eller bekrefte mistanke om feil i målingene som ble utført i Vadsø.

9 Lister

9.1 Figurliste

Figur 1 Dellag i ionosfæren.....	6
Figur 2 Krav til SNR nivå for ulike moduleringsformer	8
Figur 3 Rammestruktur.....	9
Figur 4 Testoppsett.....	11
Figur 5 Testoppsett for verifisering av måleoppsettet.....	12
Figur 6 Blokk diagram over Watterson modellen	13
Figur 7 Effektspekteret til "tap-gain" funksjonen.....	14
Figur 8 Viser medgått tid før resultater stabiliseres.....	15
Figur 9 Sammenligning av ekstern og interne bitfeil tester over en AWGN kanal.....	17
Figur 10 Måleresultater for bølgeform WID 4.....	18
Figur 11 Måleresultater for bølgeform WID 10.....	19
Figur 12 Måleresultater for bølgeform WID 0.....	20
Figur 13 Grafisk fremstilte måleresultater Svalbard – Tuentangen (DAMSON).....	23
Figur 14 Grafisk fremstilte måleresultater Harstad - Kiruna (DAMSON).....	24
Figur 15 Grafisk fremstilte måleresultater Harstad - Kiruna (DAMSON) 15-25 dB	27
Figur 16 Måleverdier fra Hønefoss 5.april klokken 02:00	29
Figur 17 HF-Spekrogram fra Hønefoss 4.april 2014 (Effekt i dBm).....	29
Figur 18 Utsnitt fra HF-Spekrogram fra Hønefoss 5.april 2014 (Effekt i dBm).....	30
Figur 19 CMA Hønefoss 5.april 3kHz båndbredde	31
Figur 20 CMA Hønefoss 5.april 12kHz båndbredde	32
Figur 21 CMA Hønefoss 5.april 24kHz båndbredde	32
Figur 22 CMA Vadsø 4.april 3kHz båndbredde.....	33
Figur 23 CMA Vadsø 4.april 12kHz båndbredde.....	33
Figur 24 CMA Vadsø 4.april 24kHz båndbredde.....	34
Figur 25 CMA Vadsø 4.april 3 kHz båndbredde med stor antenne.....	34

9.2 Tabelliste

Tabell 1 Bølgeformoversikt fra MIL-STD-188-110C.....	9
Tabell 2 Kode rater	10
Tabell 3 Interleaver parameter	11
Tabell 4 Parameter for utvalgte bølgeformer	16
Tabell 5 Resultater fra WID 0 over en HLDC kanal.....	20
Tabell 6 ITU-R sine standardisert kanalparameter.....	21
Tabell 7 Damson målekanaler	22
Tabell 8 DAMSON frekvensgrupper	23
Tabell 9 Måleresultater 5% linjen (DAMSON)	25
Tabell 10 Måleresultater 5 % linjen (DAMSON)	25

10 Vedlegg

Vedlegg A: Radio betjenings kommandoer

Vedlegg B: Simulator betjenings kommandoer

11 Bibliografi

Harris Corporation, 2012. *Harris HF Radio RF-7800H-MP*. [Internett]

Available at: http://rf.harris.com/media/RF-7800H-MP_tcm26-21753.pdf

[Funnet 24 Juni 2014].

Hayes, 1996. *Statistical Digital Signal Processing and Modeling*. Canada: John Wiley & Sons, Ltd.

International Telecommunication Union, 1998. *HANDBOOK The ionosphere and its effects on radiowave propagation*. Switzerland, Geneva: ITU.

Johnson, K. F. J. N., 2013. *THIRD-GENERATION and Wideband HF Radio Communications*. Norwood: Artech House.

Matthew J. Angling, P. S. C. J. J. a. B. L., 33. Measurements of Doppler and multipath spread on oblique high-latitude HF paths use in characterizing data modem performance. *Radio Science*, 1998(1), pp. 97-107.

Microtelecom, 2009. *Perseus Receiver*. [Internett]

Available at: <http://microtelecom.it/perseus/perseususermanual-en14.pdf>

[Funnet 24 Juni 2014].

MIL-STD-188-110C, 2011. *Interoperability and Performance Standards for Data Modems*. : .

Pike, J., 1999. *Space Policy Project*. [Internett]

Available at: <http://www.fas.org/spp/military/docops/afwa/>

[Funnet 7 Oktober 2013].

R.Smith, J., 2010. *Z1203B Active Antenna Power Coupler/DC Injector*. [Internett]

Available at: <http://www.cliftonlaboratories.com/Documents/Z1203B%20Rev%2002%20Manual.pdf>

[Funnet 24 Juni 2014].

R.Smith, J., 2010. *Z1501D Active Antenna*. [Internett]

Available at: <http://www.cliftonlaboratories.com/Documents/Z1501D%20Instruction%20Manual-01.pdf>

[Funnet 24 Juni 2014].

Saunders, A.-Z., 2007. *Antennas and Propagation for Wireless Communication Sstem*. 2nd red.

Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.

Sklar, 2001. *Digital Communications Fundamentals and Applications*. 2nd red. New Jersey: Prentice Hall.

William N.Furman, J. W. N., 2013. *Interference Environment and Wideband Channel Availability*.

Rochester, New York, Harris Corporation.