



FFI-RAPPORT

16/00576

HF-kommunikasjon i Arktis

analyse basert på målinger

—

Vivianne Jodalen
Terje Mikal Mjelde

HF-kommunikasjon i Arktis

analyse basert på målinger

Vivianne Jodalen
Terje Mikal Mjelde

Emneord

Radiokommunikasjon
Radiobølger
Radioforstyrrelser
HF (High Frequency)

FFI-rapport:

FFI-RAPPORT 16/00576

Prosjektnummer

507701 og 1376

ISBN

P: ISBN 978-82-464-2730-0

E: ISBN 978-82-464-2731-7

Godkjent av

Jan Erik Voldhaug, *forskningsleder*

Anders Eggen, *avdelingssjef*

Sammendrag

For Norges store havområder i nord, der ingen teknisk infrastruktur for kommunikasjon er tilgjengelig og geostasjonær satellittkommunikasjon gir dårlig dekning, forventes langtrekkende HF-radiokommunikasjon å bli en viktig sambandsbærer også i framtiden. På bakgrunn av dette ble CD&E-aktivitet EP 1546 "HF i Arktis" gjennomført i 2015. Prosjekt 1376 "Kommunikasjon i nord" ved FFI har også bidratt til gjennomføringen. Denne aktiviteten gikk ut på å teste ny HF-teknologi (bredbånds-HF= 4G) som kan bruke større båndbredde enn 3 kHz og dermed gi større datahastigheter enn tradisjonelt utstyr. Testene skulle måle tilgjengeligheten av HF-kanalen og kartlegge hvilke datahastigheter som kan oppnås med den nye teknologien. Målingene ble utført mellom kystvaktskipet Svalbard og landstasjonen Stangnes i løpet av et år. Resultatene viser oss trender for HF-kommunikasjonen i nord. Det statistiske grunnlaget for å trekke konklusjoner er noe svakt, gitt HF-kanalens variasjonssyklus basert på tid på døgnet, sesong og solflekk tall. Ut i fra målingene som er gjort, kan vi konkludere følgende:

Adaptiv HF der radioutstyret selv tilpasser seg de varierende kanalforholdene, opprettholder sambandet til enhver tid selv om datahastigheten vil variere. Målingene verifiserte at økt tilgjengelig båndbredde med 4G blir tatt ut som gevinst enten i form av økt datahastighet eller som mer robust kommunikasjon med lavere datahastighet.

De nye bølgeformene i Mil-Std 188-110C Appendix D som bruker varierende båndbredde opp til 24 kHz, gir en gjennomsnittlig økt datahastighet i arktiske strøk sammenliknet med tradisjonell 2G/3G HF-teknologi i 3 kHz båndbredde. På en avstand på 1000 km var den målte datahastigheten på fysisk lag cirka 20 kb/s (middelverdi over hele døgnet) på sommerstid og cirka 10 kb/s på vinterstid når ionosfæren var uforstyrret. Litt høyere hastighet oppnås på nattestid enn på dagtid. Variasjoner i målingene forekommer, avhengig av geomagnetiske forhold, absorpsjonsforhold i ionosfæren, støy og interferens. På sommerstid ble jordbølgeutbredelse observert ut til 800 km fra kysten av Norge mot nord. I dette området ble midlere datahastighet målt til cirka 30 kb/s, med maksimum 50 kb/s observert på dagtid. Tilsvarende stort dekningsområde for jordbølgen ble ikke målt på vinterstid. Den største gevinsten med 4G-teknologi kan hentes ut i områder med jordbølgeutbredelse.

De høyeste datahastighetene som er teoretisk mulig å oppnå, nås aldri i målingene våre. Det skyldes i stor grad at båndbredden som utstyret velger, er mindre enn 24 kHz, men også at signal-støy-forholdene er dårlige. Målingene har vist at kontinuerlig båndbredde større enn 3 kHz generelt er tilgjengelig.

Det anbefales at adaptiv HF implementeres for all punkt-til-punkt-kommunikasjon i Forsvaret, og at 4G vurderes implementert på Forsvarets store sjøplattformer og noder som disse plattformene primært trenger å kommunisere med. De varierende kanalforholdene på HF i nord, avhengig av tid og sted, bør også utnyttes bedre i et nettverk av noder som kan rute trafikken for hverandre.

Summary

In the Norwegian Arctic, where no technical infrastructure for communications is available and geostationary satellite communication does not give good coverage, HF radio is expected to be an important communications bearer also in the future. On this background the CD&E activity EP1546 "HF i Arktis" was carried out in 2015. The project 1376 "Communications in the north" at FFI has also contributed to the study. The purpose of the activity was to test new HF radio technology (wideband HF = 4G) that uses larger bandwidths than 3 kHz and thereby offers larger data rates than traditional HF radios. The tests were going to measure the availability of the HF channel and the data rates that can be achieved with the new technology. The measurements were carried out between the coastal guard ship Svalbard and the land station Stangnes over a year.

The results give us trends for HF communications at high latitudes. The statistical basis for drawing firm conclusions is somewhat weak, given the HF channel variability depending on time-of-day, season and sunspot number. From the measurements we can conclude as follows:

HF technology that adapts to changing channel conditions, maintain the HF connection at all times even though the offered transmission capacity varies. The measurements verified that the increased bandwidth achieved by using 4G is either used to offer larger data rates or to offer increased robustness of the communications.

The new waveforms in Mil-Std 188-110C Appendix D that use variable bandwidth up to 24 kHz, give an increased average transmission capacity in the Arctic areas compared to traditional 2G/3G HF in 3 kHz. At a distance of 1000 km the measured transmission capacity at the physical layer was approximately 20 kb/s (median value over 24 hours) in summer time and approximately 10 kb/s in winter time when the ionosphere was not disturbed. Higher values were obtained at night than during day. There are variations of these numbers due to geomagnetic conditions, absorption in the ionosphere, noise and interference. In summer time the ground wave was observed at a distance of 800 km from the Norwegian coast. In this area the median transmission capacity was measured to approximately 30 kb/s, with a maximum of 50 kb/s observed during day time. A corresponding large coverage area was not observed during winter. The largest benefit of 4G technology can be achieved in the areas where ground wave propagation is possible.

The highest theoretical data rates are never achieved in our measurements. The reason is to a large extent that the bandwidths selected are less than 24 kHz, but also that the signal-to-noise ratios are too small. The measurements have shown that continuous bandwidth larger than 3 kHz is available.

It is recommended that adaptive HF is implemented for all point-to-point communications in the Norwegian Armed Forces, and that 4G HF is considered implemented for the large naval platforms and the nodes they must communicate with.

Innhold

Sammendrag	3
Summary	4
Forord	6
1 Innledning	7
2 Ny teknologi for HF radiokommunikasjon	8
3 Måleprosedyrer	9
4 Resultater	13
4.1 Grunnlaget for å tolke målingene	14
4.2 Oppnådde datahastigheter	14
4.3 Forstyrrede ionosfæreforhold	19
4.4 Jordbølgeutbredelse over sjø	21
4.5 Tilgjengelige båndbredder	25
4.6 Overføringskapasitet til applikasjoner	28
4.7 Frekvensvalg	29
4.8 Oppdateringsbehov av kanalvalg	35
4.9 Kortholds-HF langs kysten	36
4.10 Transmisjon fra fartøy til land	38
5 Konklusjoner	40
6 Anbefalinger	41
Referanser	42
Forkortelser	43

Forord

Mange i Forsvarssektoren har bidratt til denne CD&E aktiviteten, og den hadde ikke vært mulig å gjennomføre uten alles bidrag. Vi vil spesielt nevne FMA IKT kapasiteter ved Magnar Gåsland og Gustav Tollefsen, CYFOR CKT Sjøoperativ sambandsskvadron ved Kjartan Andersen, CYFOR CTO ved Roger Johansen, og Kystvakten ved Nils Wingsternæs, Arnstein Leo Pettersen og Kjell Gunnar Mørch. Alle disse har bidratt aktivt til innsamlingen av data.

I tillegg har vi møtt på stor velvillighet i andre deler av Forsvaret i arbeidet med planleggingen og organiseringen av denne aktiviteten, og her kan spesielt nevnes NARFA, FOH, Sjøforsvarsstaben, KV, FMA Markap og FLO Vedlikehold Ramsund.

Ikke minst har CD&E aktiviteten vært mulig på grunn av sponsorstøtte fra Cyfor CKT ved Per Engelsen.

1 Innledning

HF radio (3-30 MHz) kan gi kommunikasjonsdekning jorda rundt via refleksjoner i ionosfæren og uten bruk av teknisk infrastruktur. HF kommunikasjon benytter naturressursen ionosfæren som er tilgjengelig uten omkostninger. På grunn av de langtrekkende egenskapene og dermed interferensfare, har frekvensbruk i HF-båndet vært strengt regulert og begrenset til 3 kHz båndbredde per kanal. Ionosfæren er et vanskelig medium som endres kontinuerlig av påvirkninger fra sola og det nære verdensrom, og HF-kanalen blir dermed sterkt påvirket av tilstanden til ionosfæren til enhver tid. Spesielt på høye breddegrader er ionosfæren ekstra dynamisk og komplisert på grunn av partikkelnedbør fra sola som skaper ekstra ionisasjon, som igjen forårsaker andre refleksjonsforhold og absorpsjon av radiobølger. For HF kommunikasjonen gir dette seg utslag i sterkt varierende signal-støy forhold, flerbanespredning og Dopplerspredning. Den lave båndbredden og den vanskelige kanalen begrenser den maksimale dataoverføringshastigheten på HF sterkt.

Radiobølger i HF båndet kan også utbre seg langs jordoverflaten, og denne jordbølgen kan nå mange hundre kilometer over sjø der konduktiviteten er spesielt god. Denne radiobølgeutbredelsen kjennetegnes ved en sterk, stabil signalkomponent som svekkes gradvis med avstanden. Høyere datahastigheter kan oppnås med jordbølgeutbredelse enn med ionosfærerefleksjoner da kanalforholdene er generelt bedre.

For Norges store havområder i nord der ingen teknisk infrastruktur er tilgjengelig og geostasjonær satellittkommunikasjon gir dårlig dekning, er HF kommunikasjon i dag en primær sambandsbærer, og den forventes å bli en viktig sambandsbærer også i fremtiden. På bakgrunn av dette ble CD&E aktivitet EP 1546 "HF i Arktis" gjennomført i 2015, og denne aktiviteten gikk ut på å teste ny HF teknologi som kan bruke større båndbredde enn 3 kHz og dermed gi større datahastigheter.

Aktiviteten gikk ut på å monitorere over ett år tilgjengeligheten av HF kanalen og hvilken overføringskapasitet som kan oppnås i arktiske områder med den nye teknologien. Dersom eksperimentet gir et resultat som tilsier at betydelig større overføringskapasitet kan oppnås med den nye teknologien, er det aktuelt å tilrettelegge for at den kan tas i bruk i fremtiden gjennom Forsvarets prosjekt 8041 (Oppgradering stasjonær HF infrastruktur). Økte datahastigheter på HF vil gi en bedre evne til for eksempel å overføre bilder fra fjerntliggende strøk i Arktis.

Denne rapporten formidler konkret lærdom fra aktiviteten som kan være til nytte for Forsvaret. En mer komplett framstilling av tilnærmet alle måleresultater er å finne i [1], og en beskrivelse av testmetode og programvare for testing i [2]. En artikkel med resultatene skal presenteres på en konferanse i august 2016 [3]. I 2014 ble det gjort tester av den samme teknologien i laboratoriet og disse er dokumentert i [4].

2 Ny teknologi for HF radiokommunikasjon

Amerikansk industri har tatt fram ny teknologi i form av bølgeformer som bruker båndbredder opp til 24 kHz, og disse kan dermed gi høyere datahastigheter enn det som er mulig med 3 kHz. Denne teknologien er standardisert i USA i Mil-Std 188-110C Appendix D. Figuren under viser “familien” av bølgeformer, det vil si kombinasjoner av båndbredder (vertikal dimensjon) og modulasjonstype (horisontal dimensjon) som gir en viss datahastighet på fysisk lag. Link- og nettverkslagsprotokoller vil “spise av” denne datahastigheten, så en mindre kapasitet vil tilbys til applikasjoner. Teknisk komposisjon av disse bølgeformene er blant annet beskrevet i [4].

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	

Tabell 2.1 Datahastigheter gitt av bølgeformene definert i Mil-Std 188-110C Appendix D

En svært viktig del av dagens 2G og 3G HF teknologi er utstyrets egen evne til å finne fram til rett frekvens og bølgeform tilpasset gjeldende kanalforhold. Automatic Link Establishment (ALE) definert i Mil-Std 188-141B utvikles nå videre i USA til en ny versjon av standarden som også innbefatter å finne optimal båndbredde. Foreløpig eksisterer bare proprietære protokoller for bredbånds-ALE.

I våre tester har vi brukt to stk RF-7800H fra Harris som inneholder de nye bølgeformene, datalink protokollen STANAG 5066 og Harris proprietær bredbånds ALE, blant annet beskrevet i [5].

3 Måleprosedyrer

Målingene ble utført mellom to radioer som befant seg på lang avstand fra hverandre. Den ene befant seg stasjonært på Stangnes (68.79°N, 16.59°E) og den andre befant seg om bord på KV Svalbard som seiler kontinuerlig i Barentshavet. I en kortere periode i starten av målingene kjørte vi mellom Helgelandsmoen (60.11°N, 10.23°E) og Haakonssvern (60.39°N, 5.32°E). I begge ender ble det sendt 400 W (RF-5834H-PA101 med adapter RF-7800H-AD400). De to nodene var synkronisert til GPS tid, og frekvensplanen inneholdt sju frekvenser i området 2 – 11,5 MHz.

Senderretningen var hovedsakelig én vei, men mottakeren var aktiv i linkeprosessen og ved å sende kvitteringer i forbindelse med meldingsutveksling. Antennene brukt under testene var en vertikal log periodisk antenne på Stangnes med maksimum forsterkning i 60° øst for nord (sender), og en rundstrålende vertikal pisk om bord på KV Svalbard (mottaker). På Helgelandsmoen ble det brukt en horisontal log-periodisk antenne med retning 285° (sender), og på Haakonssvern en horisontal dipol med send/mottaksretning øst-vest (mottaker). Bilder av antennene er vist i figurene 3.1 til 3.4.



Figur 3.1 *Horisontal log-periodisk antenne på Helgelandsmoen. Retning 285°W.*



Figur 3.2 *Horisontal dipol antenne på Haakonsværn. Retning øst-vest.*



Figur 3.3 *Vertikal log-periodisk antenne på Stangnes. Retning 60°E.*



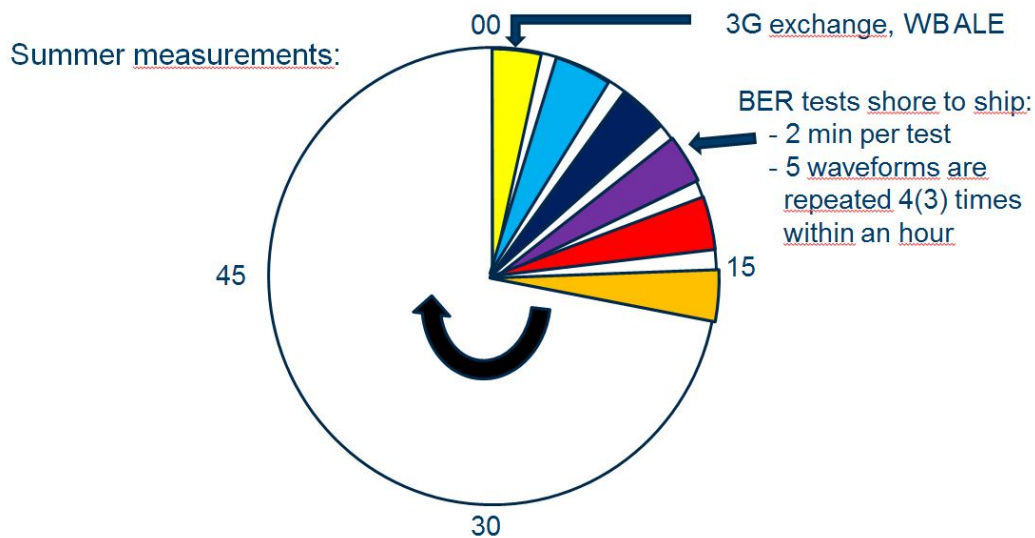
Figur 3.4 *Vertikal pisk antenne ombord på KV Svalbard (høyre side på bildet).*

For å kunne gjøre et stort antall målinger, ble et testscript som kontrollerte radioene og kjørte et testprogram basert på tid, utviklet av FFI. Detaljer for dette kan finnes i [2]. Testscriptet kjørte 24 timer i døgnet, og det kjørte bredbånds-ALE hver hele time som valgte ny frekvens og båndbredde.

Målingene ble startet opp i slutten av mars 2015 og kjørte i april måned på test-strekket Helgelandsmoen – Haakonssvern, 278 km. Dette for å etablere en grunnleggende forståelse for hvor høye datahastigheter vi kunne oppnå på en kanal som forventes å være mindre forstyrret enn en kanal i nordlige områder. Målinger ble så startet opp mellom Stangnes og KV Svalbard i slutten av april og gjennomført her til midten av august. I denne perioden bestod målingene utelukkende av bitfeilratetester som ble kjørt enveis fra Stangnes til KV Svalbard. Det var ønske om også å kjøre meldingsutveksling med S5066 protokollen, men Harris programvaren på dette tidspunktet tillot ikke script kontroll av WMT (Wireless Messaging Terminal - Harris proprietær meldingsapplikasjon). Testprogrammet i hver time i denne perioden var som følger:

- 1) 3G exchange for å bestemme optimal frekvens, etterfulgt av bredbånds-ALE for å finne optimal båndbredde. Disse ble så beholdt gjennom hele timen.
- 2) Av prosessen i punkt 1 kom også en anbefalt bølgeform. Det ble så kjørt fem 2-minutters bitfeiltester i sekvens på følgende bølgeformer:
 - den anbefalte bølgeformen
 - tilstøtende øvre bølgeform til den anbefalte
 - tilstøtende nedre bølgeform til den anbefalte
 - den mest robuste bølgeformen (spredt spektrum modulasjon)
 - den anbefalte bølgeformen, men i 3 kHz båndbredde
- 3) Disse bitfeilratetestene ble gjentatt i resten av timen til et totalt antall på 18 tester

Testprogrammet er illustrert i Figur 3.5, og et eksempel på fem bølgeformer som testes i en time er vist i Figur 3.6.

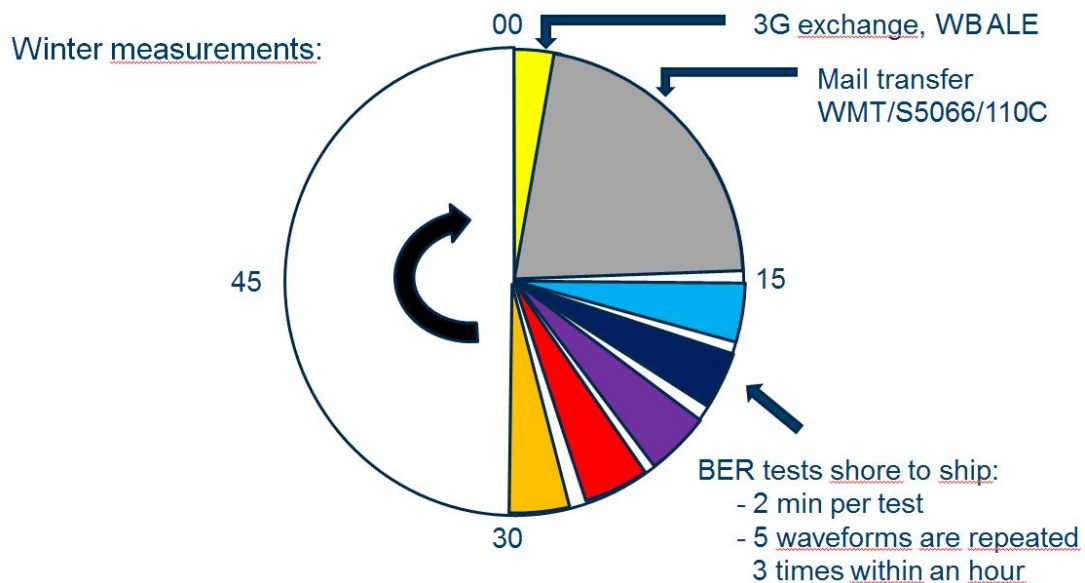


Figur 3.5 Timesbasert testprogram utført i første del av målingene. Ingen epost utveksling.

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	

Tabell 3.1 Fargede sirkler viser et eksempel på hvilke fem bølgeformer som blir testet i løpet av en time. Radioene har her automatisk valgt båndbredde 15 kHz og modulasjon QPSK med resulterende datahastighet 16 kb/s som den optimale bølgeformen

I september ble ny programvare gjort tilgjengelig for oss fra Harris, og med denne kunne vi få lagt inn test av meldingsoverføring i tillegg til bitfeiltestene. Testscriptet tok nå kontroll over WMT applikasjonen og en e-post på størrelse 100 kByte ble sendt en gang i timen. S5066 sørget for kvitteringer i meldingsoverføringen. En maksimum tid på 13 minutter ble avsatt til meldingsoverføringen, og dersom meldingen ikke var kommet over innen den tid, ble overføringen avbrutt. Nye målinger ble startet opp i oktober med litt endret testprogram, som illustrert i Figur 3.6. Det totale antallet bitfeiltester var nå redusert til 15 per time.



Figur 3.6 Timesbasert testprogram utført i siste del av målingene. Inkludert epostutveksling.

4 Resultater

Målingene ble utført fra april 2015 til mars 2016. Databasen som ble samlet inn er imidlertid mye mindre enn ett fullt år med data, da utstyret tidvis måtte skrus av på grunn av operative forhold, samt at vi hadde noen tekniske problemer underveis. Databasen kan grovt sett sies å bestå av:

- Helgelandsmoen - Haakonsværn, april 2015, 1 måned med data
- Stangnes – KV Svalbard, mai-august 2015, 2 måneder med data
- Helgelandsmoen – USA, oktober 2015, 2 uker med data
- Stangnes – KV Svalbard, november-januar 2016, 3 måneder med data
- KV Svalbard – Stangnes, februar-mars 2016, 1 måned med data

Nesten alle dataene er plottet og vist i [1], mens ingen analyse og konklusjoner er trukket der. I denne rapporten beskriver vi observasjoner i dataene og trekker konklusjoner på mange forskjellige aspekter av målingene. Vi belyser observasjonene med eksempler, enten fra enkeltdager eller fra et sett med dager der målingene er funnet like nok til å kunne midles over.

4.1 Grunnlaget for å tolke målingene

Resultatene kommer fra Harris sin implementasjon av bølgeformene og deres proprietære bredbånds ALE. Utstyrets evne til å velge rett frekvens og båndbredde for eksempel, er utelukkende en Harris egenskap som ikke kan sies å gjelde radioutstyr fra andre leverandører. Resultatene vil likevel gi en god pekepinn på hva den mest moderne teknologien på HF uavhengig av leverandør vil kunne gi av ytelse i nordområdene.

For å trekke konklusjoner basert på statistikk, trengs et stort antall målinger å midle over. Siden HF kanalens egenskaper endrer seg med 11 års solflekksyklus, årstid, tid på døgnet, geomagnetiske forstyrrelser i ionosfæren, geografisk posisjon og avstand, har vi svært lite med målinger for å kunne trekke slutninger som gjelder for HF generelt under alle forhold. Vi har kun dekket noen forhold med denne målekampanjen som strakk seg over nesten ett år, og resultatene er således gyldige for de forhold vi rakk å måle over. Vi har valgt å sortere dataene på:

- årstider (sommer/vinter),
- avstander mellom sender og mottaker (områder rundt Svalbard 900-1300 km, strekk mellom fastlandet og Svalbard 150-900 km, langs norskekysten < 150 km)
- geomagnetisk aktivitet i ionosfæren målt med indeksen A ($A < 10$, $10 < A < 20$, $A > 20$)

4.2 Oppnådde datahastigheter

Det viktigste spørsmålet som skulle besvares var hvilke datahastigheter som kan oppnås med de nye bølgeformene i arktiske områder. Svaret er avhengig av forholdene nevnt over og her gis noen eksempler på det som ble målt. I Figur 4.1 vises data fra strekningen Helgelandsmoen-Haakonsværn. Vi har midlet 15 dager målt i mars-april 2015 under rolige geomagnetiske forhold. Det øverste plottet viser hvilke datahastigheter som automatisk ble valgt hver time, og der ser vi at maksimum hastighet på nesten 40 kb/s oppnås midt på dagen. Her ser vi en tydelig døgnvariasjon i oppnådd hastighet. De to nederste plottene viser i hvilken grad den automatisk valgte datahastigheten var en suksess i form av det prosentvise antallet bitfeiltester som hadde en målt bitfeilsannsynlighet (BER) på $< 10^{-3}$. Dette definerer vi som suksessrate. I disse plottene angir den røde stolpen suksessraten for den automatisk valgte datahastigheten. Den rosa og gule stolpen viser suksessraten for henholdsvis den lavere tilstøtende bølgeformen og den høyere tilstøtende bølgeformen. Som ventet er rosa stolpe høyest og gul stolpe lavest. Grønn stolpe angir suksessraten til den robuste bølgeformen og blå stolpe den automatisk valgte bølgeformen i 3 kHz båndbredde. Kurveforklaringene i plottene viser henholdsvis medianen over alle 24 timesmedianer i øverste plott og gjennomsnittet over alle 24 timesgjennomsnitt i de to nederste plottene.

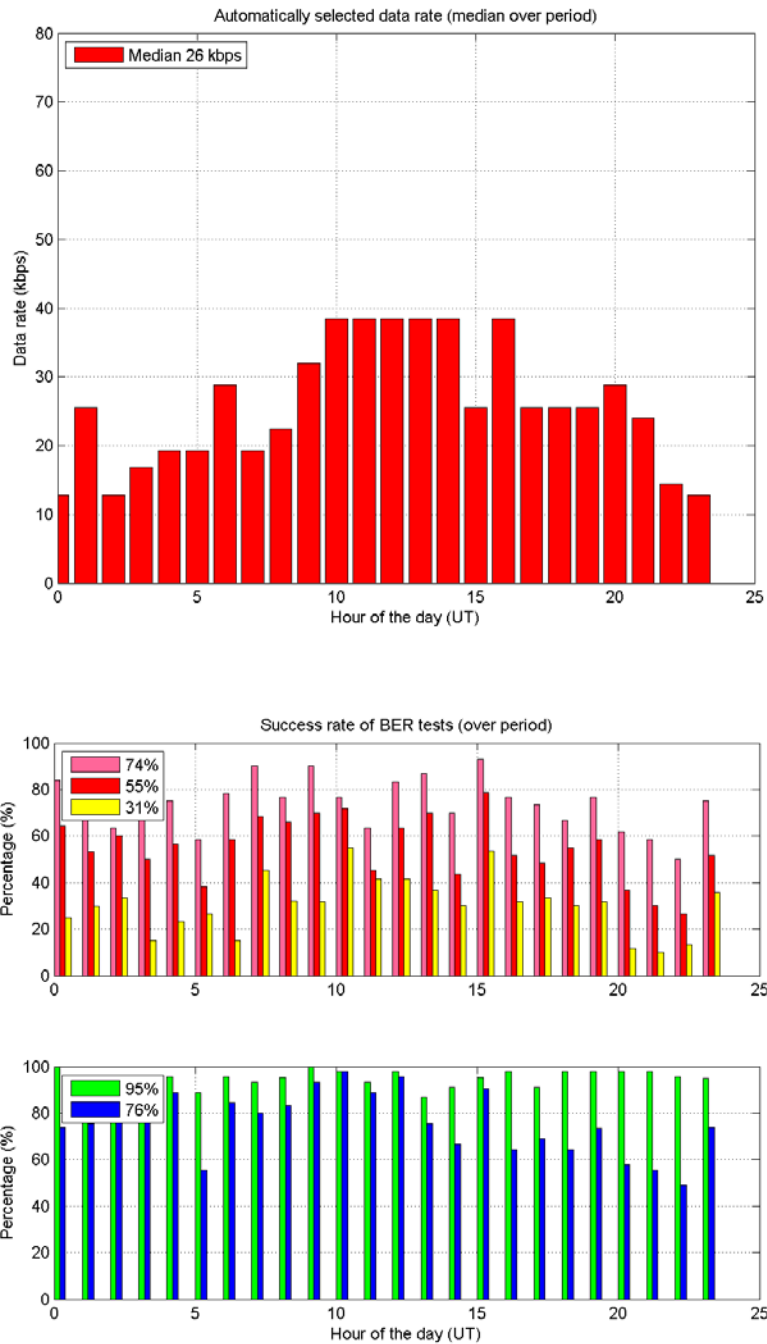
Vi ser at selv om datahastighet er mye høyere på dagtid enn på nattetid (øverste plott), så er det ikke stor variasjon i suksessraten gjennom døgnet (nederste plott). Det betyr at utstyrets evne til selv å velge optimal bølgeform gir oss en stabil tjeneste gjennom hele døgnet som tilbyr bedre overføringshastigheter midt på dagen.

Den robuste bølgeformen gir en gjennomsnittlig suksessrate på 95 % over døgnet (grønn stolpe). Denne vil nesten alltid være tilgjengelig for kommunikasjon.

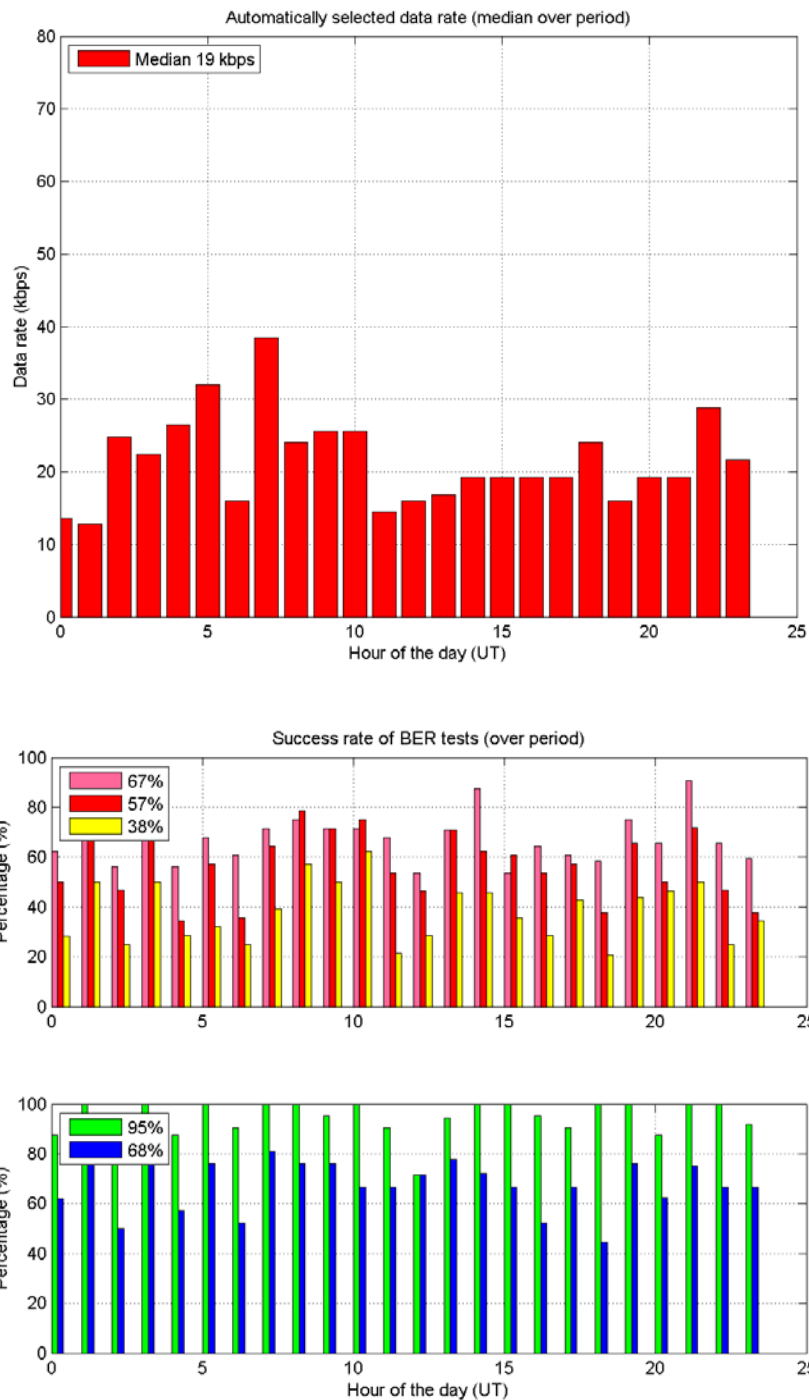
Blå stolpe representerer suksessraten til tradisjonell 2G HF teknologi med automatisk valg av frekvens. Hvis blå stolpe sammenlignes med rød stolpe som bruker den samme bølgeformen, så har blå stolpe 20 % mer suksess enn rød stolpe. Årsaken til dette er forskjell i signal-støy forhold (SNR) mellom de to, der målingene representert med rød stolpe opplever et lavere SNR fordi båndbredden er høyere.

Den neste figuren, 4.2, viser tilsvarende for et langt strekk fra Stangnes til KV Svalbard når denne befinner seg i området rundt Svalbard (~1000 km) rundt sommersolverv, og de geomagnetiske forholdene er rolige ($A < 10$). Siden målingene er gjort rundt sommersolverv, er ionosfæren solbelyst hele tiden og vi ser like forhold gjennom hele døgnet. Medianen av datahastighet som oppnås er rundt 20 kb/s. Suksessraten er forholdsvis lik det som ble målt på det sørlige strekket.

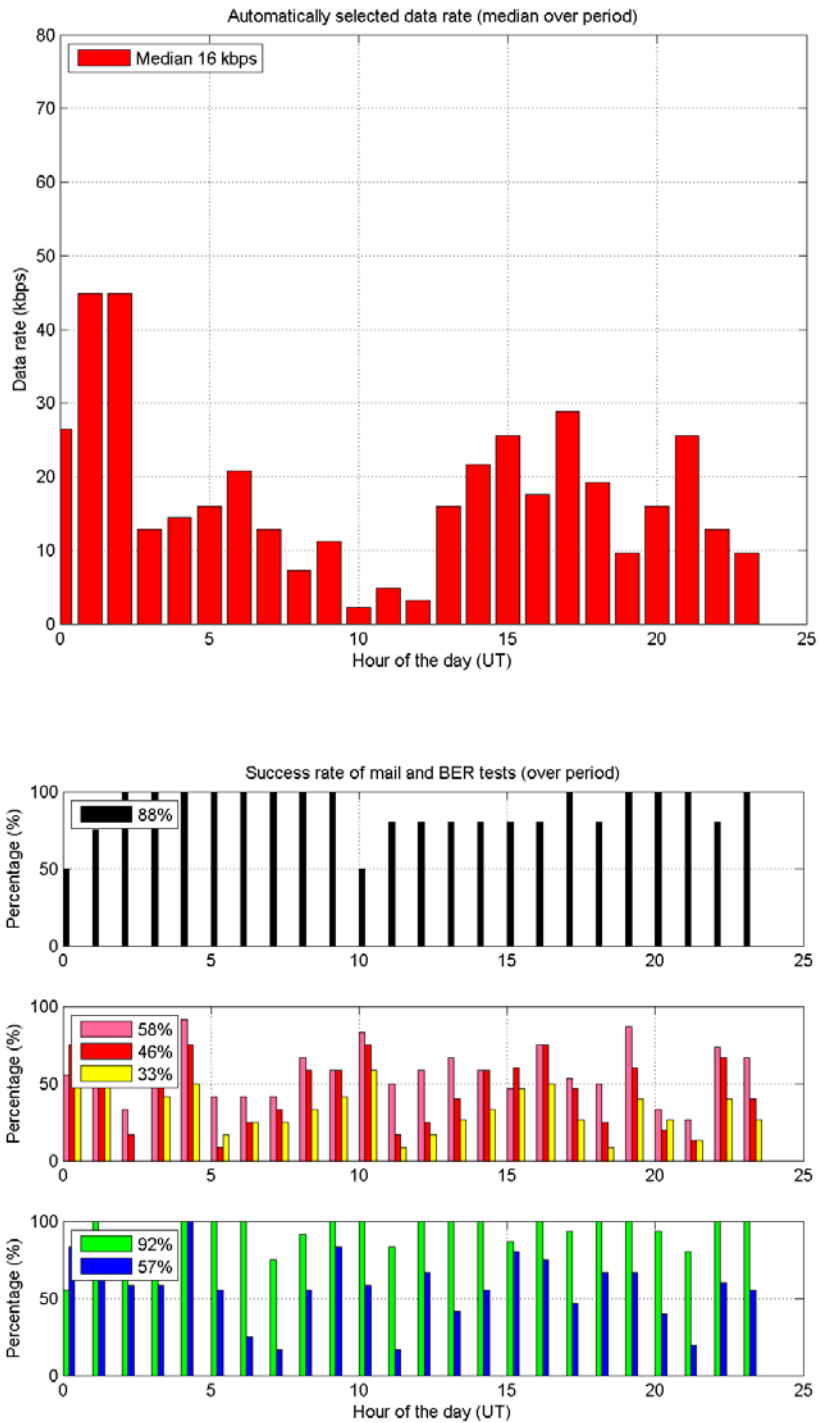
Figur 4.3 viser målinger på samme avstander rundt vintersolverv med samme lave geomagnetisk indeks ($A < 10$). Igjen er solforholdene i ionosfæren ganske lik gjennom døgnet, så ingen typisk døgnlig variasjon kan sees. Den høye datahastigheten rett etter midnatt skyldes økt båndbreddebruk. Midlere datahastighet gjennom døgnet er 16 kb/s, litt lavere enn på sommerstid. Det øverste panelet med svarte stolper i Figur 4.3 viser suksessraten av meldingsoverføringen som ble gjort en gang i timen i vintermålingene. Med fem døgn i databasen for dette plottet, er det maks fem meldinger som kan ha blitt mottatt med suksess for en gitt time. Suksessraten for BER testene (fargede stolper) er ca 10 % lavere enn for sommerdataene. Datahastighet og kvalitet på kanalen er således noe dårligere på vinteren enn på sommeren.



Figur 4.1 Datahastigheter og suksessrater for Helgelandsmoen-Haakonsværn, mars-april 2015, geomagnetisk rolige forhold, 15 dager midlet



Figur 4.2 Datahastigheter og suksessrater for Stangnes-KV Svalbard, avstander rundt 1000 km, mai-juni 2015, geomagnetisk rolige forhold, 9 dager midlet



Figur 4.3 Datahastigheter og suksessrater for Stangnes-KV Svalbard, avstander rundt 1000 km, januar 2016, geomagnetisk rolige forhold, 5 dager midlet

4.3 Forstyrrede ionosfæreforhold

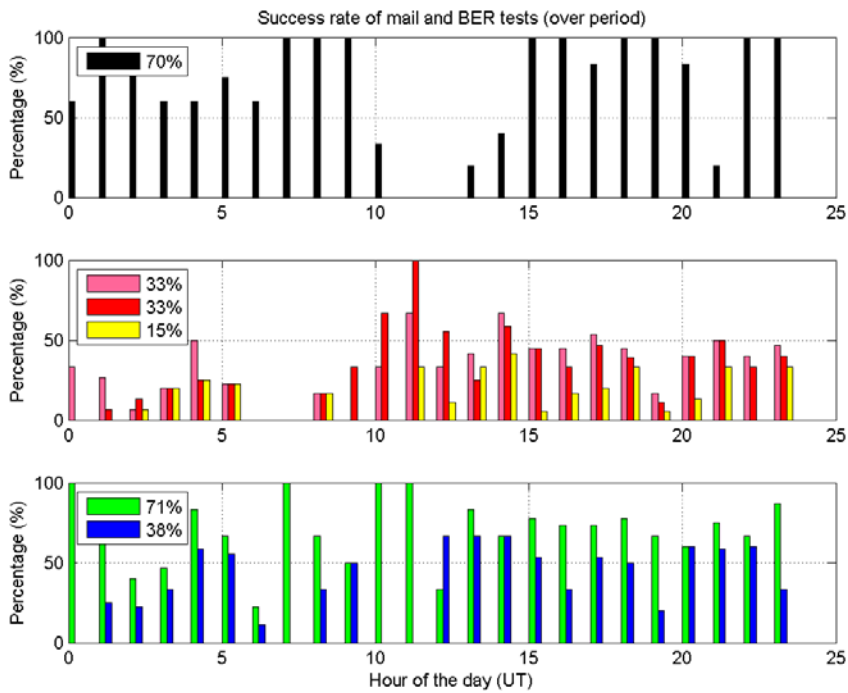
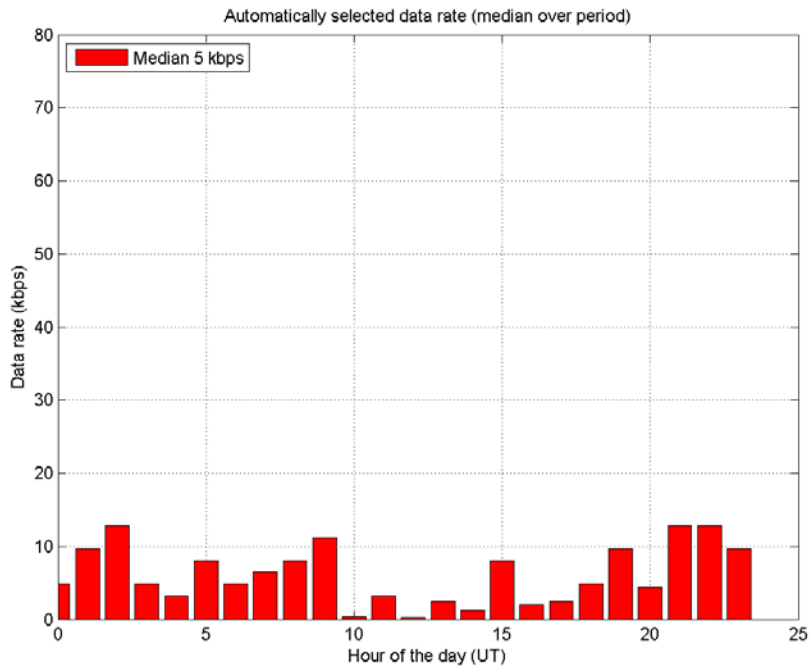
Resultatene i Seksjon 4.2 representerer uforstyrrede geomagnetiske forhold i nord. Når det er en forstyrrelse av ionosfæren, blir forholdene vanligvis dårligere. Forstyrrelsene som kan forekomme kan ha forskjellig natur, og vi har valgt å bruke forstyrrelse av jordas magnetfelt representert ved den geomagnetiske indeksen A [6], som en indikator på en generelt forstyrret ionosfære. Det kan være andre forstyrrelser som ikke plukkes opp av denne indeksen. I Figur 4.4 vises resultatene for en geomagnetisk svært forstyrret periode ($A > 20$) når KV Svalbard befant seg rundt Svalbard på vinteren. Vi ser at medianen av datahastigheter er sunket til 5 kbps og suksessraten for BER testene er under 50 % bortsett ifra for den robuste bølgeformen som har en suksessrate på 71 %.

Et typisk trekk for nordlige breddegrader og forstyrrede forhold er dårlige forhold for HF kommunikasjon på natta og spesielt i morgentimene. Tunge partikler utsendt fra sola ankommer ionosfæren på morgenen og forårsaker absorpsjon av radiosignaler. Selv om suksessraten for BER testene er på under 30 % i disse timene, klarer likevel S5066 protokollen med repetisjon av datapakker å få over meldingene som blir sendt. Dette vises med en bra suksessrate for meldingsoverføring i disse timene i øverste panel.

Den lave suksessraten for meldingsoverføring midt på dagen skyldes at lav datarate ble valgt (se øverste plott) og dermed klarer ikke radioene å overføre meldingen i løpet av de maksimum 13 minuttene som ble avsatt til meldingsoverføring. Det er trolig at suksessraten for meldingsoverføring hadde vært 100 % i disse timene dersom tiden hadde tillatt fullføring. En spekulasjon på virkemåte for radioene her er at radioene "lærte" fra de vanskelige timene på morgenen at de måtte velge lav datahastighet/robuste bølgeformer for å lykkes, og dermed steg suksessraten for BER testene utover dagen.

To perioder med data på henholdsvis 4 dager i november og 5 dager i januar når fartøyet befant seg rundt Svalbard hadde lav og svært lik geomagnetisk aktivitet registrert ved A-indeksen [6]. Absorpsjonsnivået i ionosfæren målt med riometer på Svalbard [7] ble sjekket, og det var også svært lavt og nesten identisk registrering for de to periodene. Likevel ble medianen av datahastighet over 24 timer målt til henholdsvis 6 kb/s i november og 16 kb/s i januar. Forskjellen i datakapasitet tror vi dermed kan skyldes økt støy og interferensnivå i november siden både SNR og båndbreddevalg var lavere for november perioden enn for januar perioden. En annen forklaring kan være at det var spesielt gode forhold i januar (av ukjent grunn) siden flere målte størrelser skiller seg ut, også fra målinger gjort i februar (se Seksjon 4.10).

På enkeltdager forekom det forstyrrelser som typisk varte flere timer. Forstyrrelsene kan blokkere utveksling mellom radioene helt, eventuelt kan linking oppnås, men få og ingen vellykkede bitfeil tester eller meldingsoverføringer lykkes. Det er relativt god korrelasjon mellom geomagnetisk indeks og forstyrrelser, men korrelasjonen er ikke absolutt. Eksempler på ytelse på enkeltdager med forstyrrelser kan studeres i notat [1], for eksempel dagene 4/11, 7/12, 11/12, 14/12, 18/2.



Figur 4.4 Datahastigheter og suksessrater for Stangnes-KV Svalbard, avstander rundt 1000 km, desember 2015, geomagnetisk svært forstyrrede forhold, 8 dager midlet

4.4 Jordbølgeutbredelse over sjø

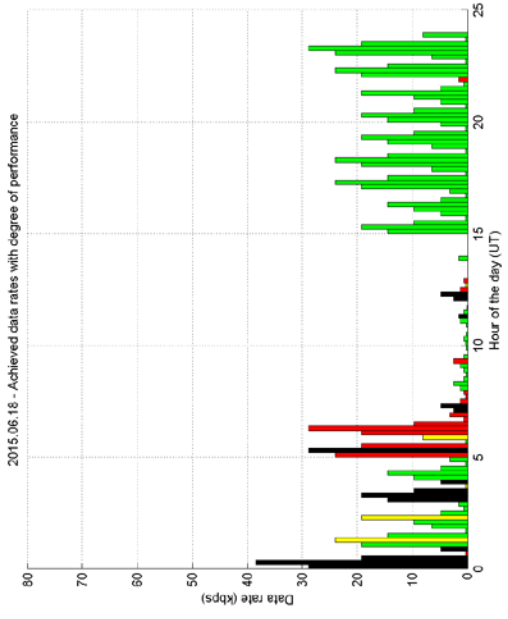
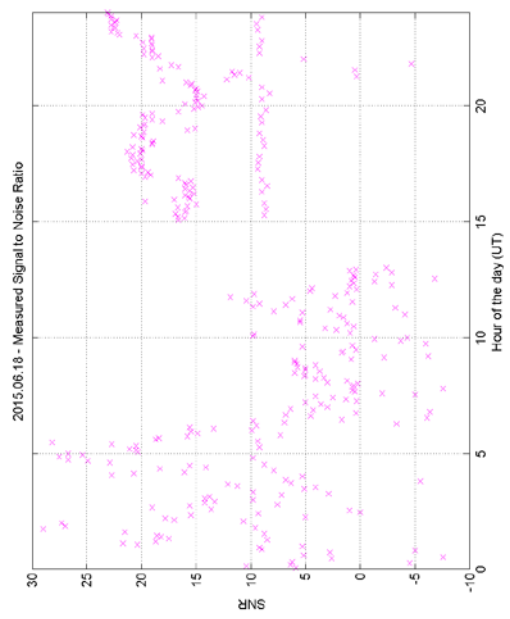
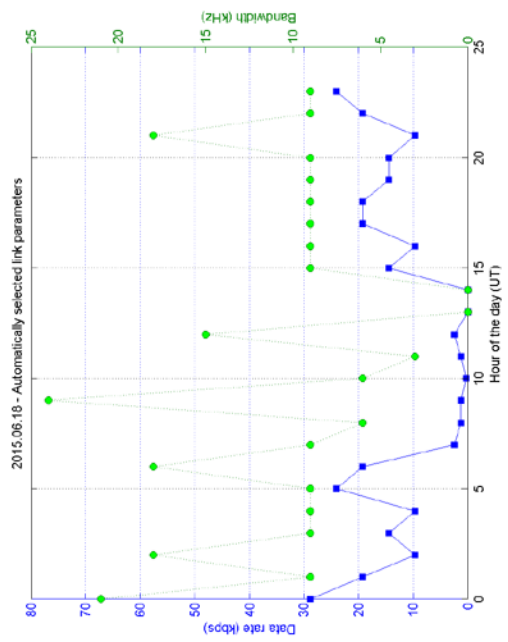
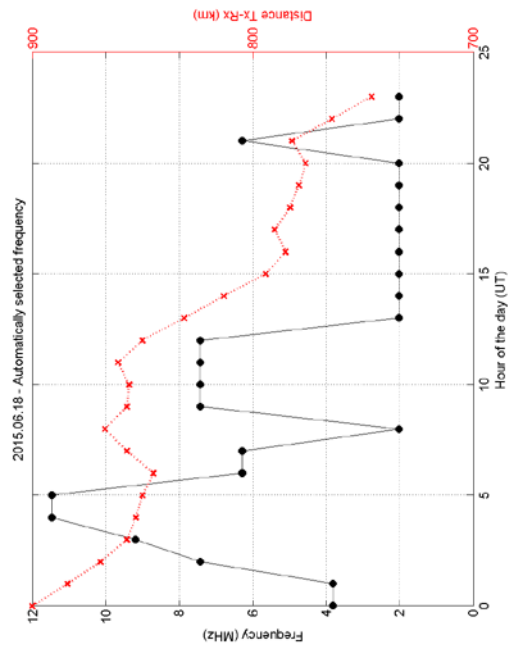
Jordbølgeutbredelse på HF vil kunne gi en mye mer stabil kanal enn ionosfæreutbredelse, der flerbaner ikke er et problem, og høye signal-støy forhold uten fading kan oppnås. Jordbølgen vil i liten grad være influert av ionosfæreforhold, men den er i stedet avhengig av konduktivitet og relativ permittivitet i jordsmonnet som er svært god over salt sjøvann. Lave frekvenser gir den beste rekkevidden. Siden senderantennen på Stangnes var en vertikal log-periodisk antenne og mottakerantennen på fartøyet var en vertikal piskantenne, ga dette et godt utgangspunkt for å aktivere jordbølgen. Utsendt effekt var 400 W, altså noe under det som Forsvarets HF stasjoner langs kysten er i stand til å sende ut av effekt. Utsendt effekt vil ha stor betydning for rekkevidden med jordbølgen.

Bølgeformene i Mil-Std 188-110C med de høyeste datahastighetene (96 og 120 kb/s) er designet for bruk med jordbølge og de vil neppe/aldri bli valgt når kun en ionosfærekanal er tilgjengelig. Det var interessant å finne ut hvor høye datahastigheter vi kunne oppnå med den nye teknologien over jordbølge.

Identifikasjon av at jordbølgeutbredelse har forekommet har vi gjort på bakgrunn av SNR målinger, frekvensvalg og suksessrate av bitfeilmålingene. Et eksempel på en dag der bølgeutbredelsen skifter fra å være ionosfærebølge til å bli jordbølge er den 18. juni. Figur 4.5 viser fire plott av dataene denne dagen. Plottet øverst til venstre (i portrettvisning) viser hvilken frekvens som ble valgt hver time (svart kurve) og avstand mellom fartøy og landstasjon (rød kurve). Plottet øverst til høyre viser den automatisk valgte datahastigheten (blå kurve) og båndbredde (grønn kurve). Plottet nederst til venstre viser målt SNR for alle BER tester i respektiv valgt båndbredde (som kan være forskjellig fra time til time). Det siste plottet viser datahastigheten for BER-testene i vertikal dimensjon og graden av suksess med farge: Grønn – 3 eller 4 tester hadde $BER < 10^{-3}$, Gul – 2 tester oppfylte BER-kravet, Rød – 1 test oppfylte BER-kravet, Svart – tester ble mottatt, men ingen oppfylte kravet.

Vi ser at ved tidspunktet 15 UT er fartøyet ca 800 km unna Stangnes på tur sørover, og SNR går over fra å være svært spredt til å være ganske stabil på 20 dB (i 9 kHz båndbredde). Frekvensen er 2 MHz og båndbredden ligger stort sett på 9 kHz. Med denne båndbredden kan 48 kb/s oppnås teoretisk med modulasjonen 256 QAM, men det som i praksis velges er 16 QAM som gir 19.2 kB/s. Vi ser at BER testene har stor suksess (grønt) etter at jordbølgen blir den dominerende moden. I forhold til målt SNR og lab-resultater målt på en ideell hvit støy kanal [4], så er bølgeforms-valget et konservativt valg. Men så er jo heller ikke den målte kanalen en hvit støy-kanal.

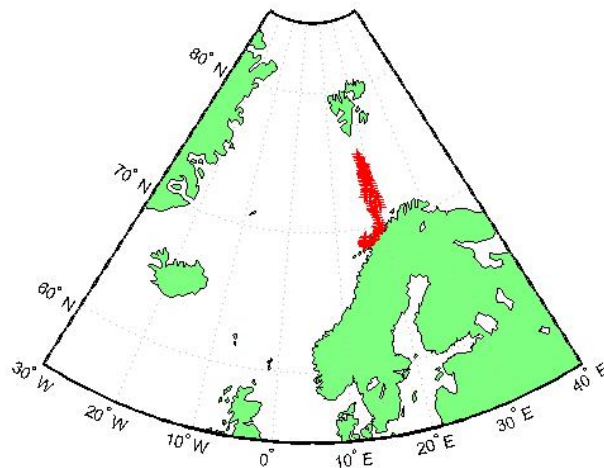
Det er en interessant observasjon at jordbølgen utgjør det sterkeste signalet på en avstand av 800 km. Det var kun én observasjon av jordbølge så langt ut, men i sommerdataene ble jordbølge observert både i mai og august på 650 km. Vinterdataene tegner et helt annet bilde. Der er jordbølgeutbredelse bare sporadisk å se, og ikke så langt ut som i sommerdataene. Konduktiviteten i sjøvann er avhengig av saltinnhold og temperatur, så en spekulasjon går på at temperaturen kan være årsaken til de forskjellige resultatene på sommer og vinter.



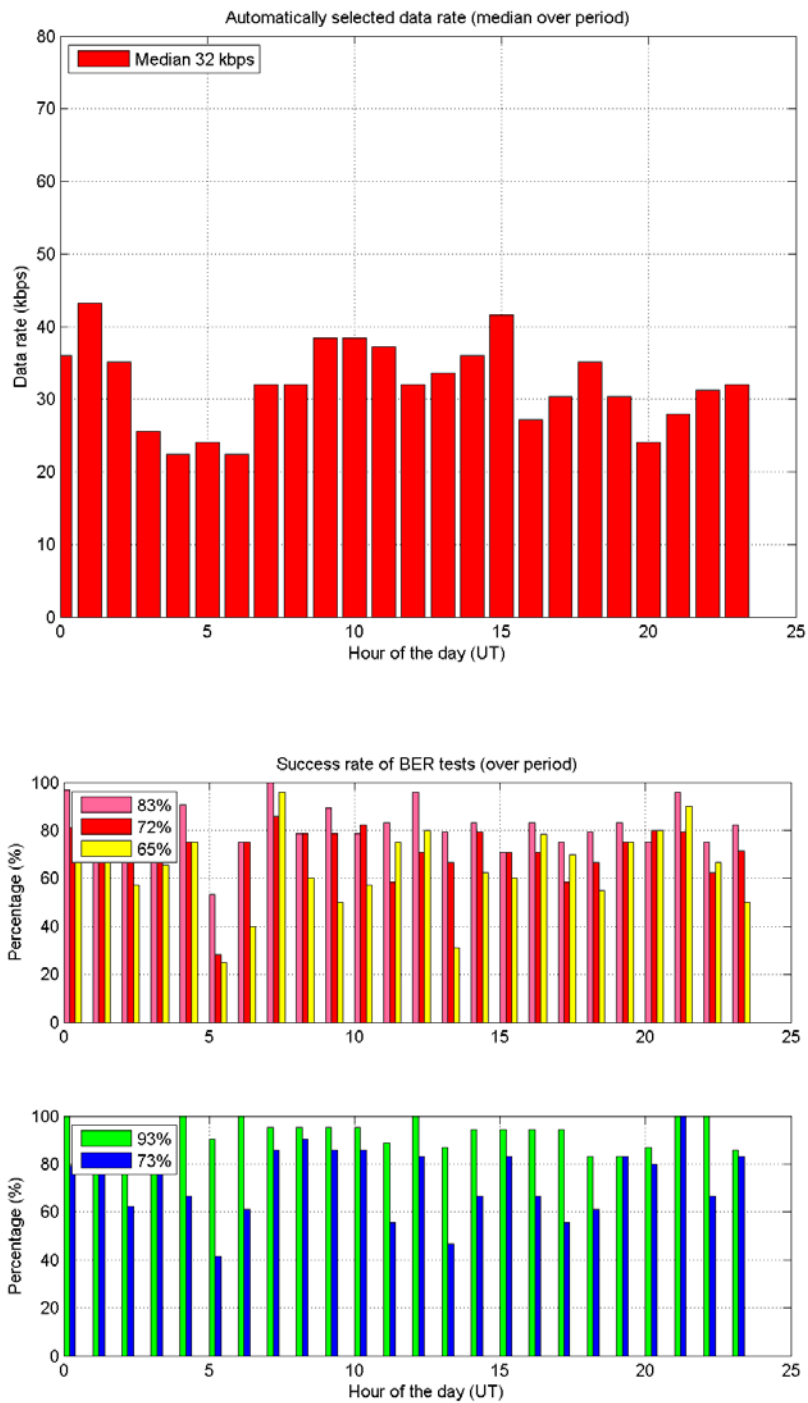
Figur 4.5 Data for en enkelt dag, 18/6-2015. Skifte fra ionosfærebølgesignal til jordbølgesignal på ca 800 km afstand.

Det beste resultatet med hensyn til oppnådde datahastigheter i nord ble oppnådd i de farvannene der jordbølgen dominerte om sommeren. Figur 4.6 viser posisjonene til fartøyet over en periode på 8 dager med tilhørende midlede data i Figur 4.7.

Ingen utpreget døgnlig variasjon er å se, og medianen av oppnådde datahastigheter er 32 kb/s. Suksessraten av BER tester er svært høy, og det er grunn til å tro at radioens valg av datahastigheter er litt for konservativt.



Figur 4.6 *Posisjoner for fartøyet i løpet av 8 dager i mai og juni 2015 der jordbølgen dominerer*



Figur 4.7 Datahastigheter og suksessrater for Stangnes-KV Svalbard, mai og juni 2015, jordbølgeutbredelse over sjø, 8 dager midlet

4.5 Tilgjengelige båndbredder

Harris sin proprietære bredbånds ALE protokoll bestemmer selv hvilken båndbredde som er tilgjengelig og skal brukes til enhver tid [5]. 24 kHz båndbredde kan gi en teoretisk maksimum datahastighet på 120 kb/s mens 12 kHz gir 64 kb/s. Vi har analysert hvilke båndbredder som faktisk ble valgt under våre målinger, og resultatene vises i Figurene 4.8 til 4.10 for noen typiske perioder.

På det sydlige strekket var 24 kHz båndbredde i stor grad tilgjengelig, og det gir datahastigheter opp til 40 kb/s som vist i Figur 4.1. Det vil igjen si at radioene valgte maksimum 8PSK som modulasjonsform (ut fra Tabell 2.1).

På strekket Stangnes-Svalbard (ca 1000 km) om sommeren under rolige ionosfæreforhold viser båndbreddefordelingen at 12 kHz er en dominerende båndbredde. Med denne båndbredden oppnås cirka 20 kb/s i målingene, og igjen er 8PSK den høyeste modulasjonsformen som blir valgt.

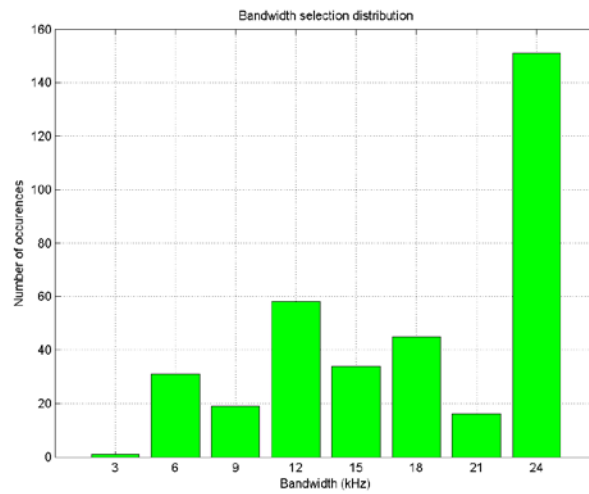
Ved jordbølgeutbredelse på kortere avstander enn 650 km blir 24 kHz båndbredde valgt i stor grad (Figur 4.10). Her er det tydelig at enten er det en «åpning» på 24 kHz (kanskje mer, men det ble i så fall ikke testet), eller så er det typisk 9-12 kHz som er tilgjengelig.

Vi delte dataene opp i 8 timer rundt geomagnetisk midnatt (18-01 UT) og 8 timer rundt lokal middag (07-14 UT). Det viser seg å være svært liten forskjell i båndbreddebruk mellom dag og natt i sommermålingene i nord og på det sørlige strekket. I vintermålingene derimot, er det en merkbar forskjell, der 24 kHz er mye mer tilgjengelig på nattetid enn på dagtid, og et eksempel på dette vises i Figur 4.11. Resultatet var noe annerledes for senderretning motsatt vei fra fartøy til land, se Seksjon 4.10.

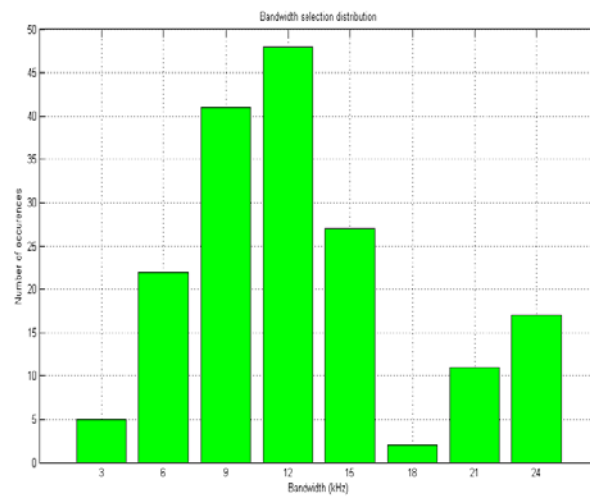
Det var ingen markante forskjeller mellom geomagnetisk rolige og forstyrrede perioder hverken i sommer eller vintermålingene.

Generelt kan sies at 3 kHz i liten grad velges. Det vil si at det med disse målingene er vist at mer en 3 kHz kontinuerlig båndbredde er tilgjengelig i de områder det er målt.

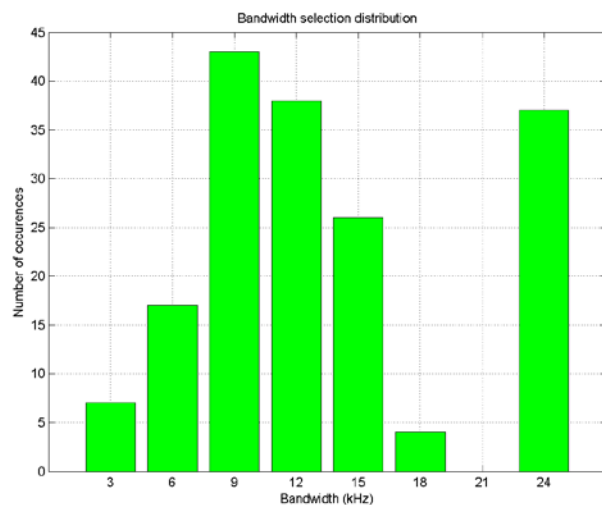
Regulatorisk tilgang på frekvensbånd større enn 3 kHz er et tema som ikke berøres i denne rapporten. Generelt kan sies at kommersielle kringkastere på HF er i ferd med å bli lagt ned, og spektrum frigjøres. Når det nå eksisterer systemer som kan benytte seg av større båndbredder på en adaptiv måte, vurderer vi det som svært sannsynlig at disse vil bli akseptert av regulatoriske myndigheter i fremtiden.



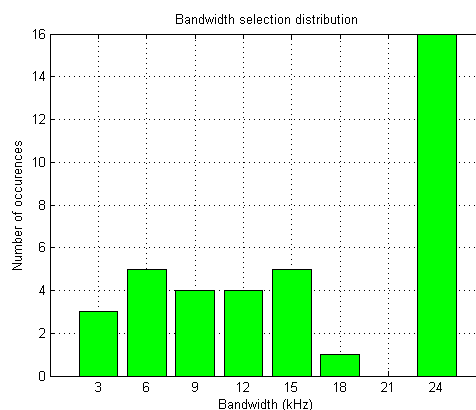
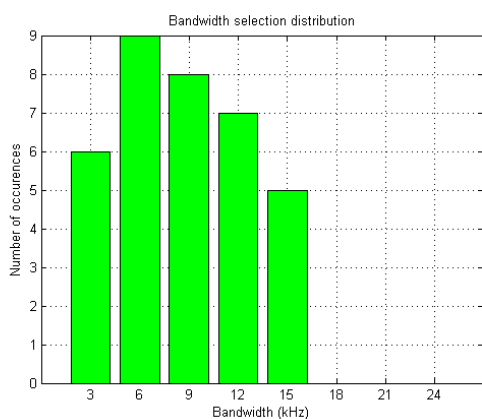
Figur 4.8 *Fordeling av valgt båndbredde på Helgelandsmoen-Haakonsværn, mars-april 2015, rolige ionosfæreforhold, samme 15 dager som i Figur 4.1*



Figur 4.9 *Fordeling av valgt båndbredde på avstander rundt 1000 km, mai-juni 2015, rolige ionosfæreforhold, samme 9 dager som i Figur 4.2*



Figur 4.10 Fordeling av valgt båndbredde på avstander mindre enn 650 km, jordbølge dominerer, mai-juni 2015, samme 8 dager som i Figur 4.7



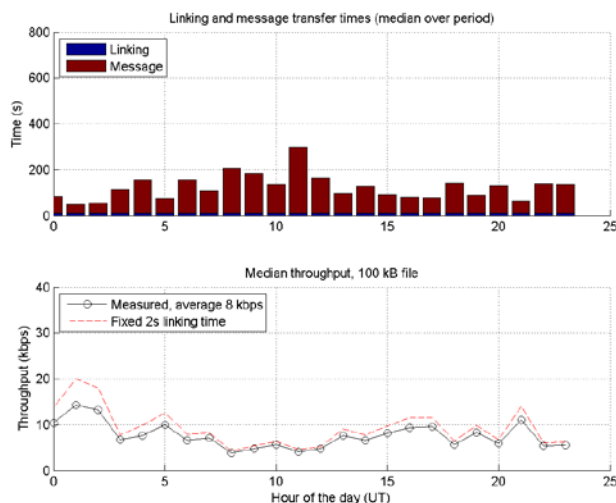
Figur 4.11 Fordeling av valgt båndbredde på avstander rundt 1000 km splittet opp i dag og natt. Dagsmålinger til venstre, nattmålinger til høyre. Januar 2016, samme 5 dager som i Figur 4.3.

4.6 Overføringskapasitet til applikasjoner

I siste halvdel av målingene som foregikk på vinteren, fikk vi lagt inn overføring av en melding som en del av testprogrammet hver time. Dette er beskrevet i Kapittel 3. Under meldingsoverføring bruker datalinkprotokollen noe av kapasiteten som det fysiske laget er i stand til å tilby og som måles med BER testene. Resterende kapasitet kan brukes til å overføre nyttedata. Vi målte tiden det tok å overføre meldingen (100 kB) mellom Harris sin WMT i hver ende og fant med dette overføringskapasitet (eller throughput) på applikasjonsnivå. Suksessraten til meldingsoverføringene er vist i samme plott som BER testene (eksempelvis Figur 4.3 og 4.4) mens overføringskapasiteten er vist i eget plott, eksempelvis Figur 4.12.

For alle periodene av dager som vi midlet over, lå gjennomsnittlig overføringskapasitet mellom 4 og 8 kb/s. Den målte overføringskapasiteten er sterkt avhengig av størrelsen på fila som ble sendt over, og den vil være noe større for en større fil. Et eksempel på målt overføringskapasitet er vist i Figur 4.12 som i øverste panel viser tiden brukt på henholdsvis opplinking og meldingsoverføring, og i nederste panel viser den beregnede overføringskapasiteten gitt filstørrelsen 100 kB. Gjennomsnittlig overføringskapasitet er her 8 kb/s. Enkeltdager viste overføringskapasiteter mellom 10 og 20 kb/s. Den røde kurven i nederste plott viser overføringskapasitet dersom det antas en fast linketid på 2 s. Dette er den raskeste linketid som er forespeilet i den kommende amerikanske standarden for bredbånds-ALE.

Selv om denne overføringskapasiteten ikke er veldig stor, er den likevel en god del større enn det som er tilgjengelig med tradisjonell 3 kHz HF radio. Målingene viser også at en datalink protokoll gir en «seighet» i systemet, slik at meldingen vil komme fram til slutt bare det kan brukes litt ekstra tid. Suksessraten for meldingsoverføringen var ofte 100 %, og i de tilfeller den ikke var det, skyldes det i stor grad at overføringen ble avbrutt på grunn av utløpt tid.



Figur 4.12 Målt overføringskapasitet på applikasjonsnivå. Samme 5-dagers periode som i Figur 4.3.

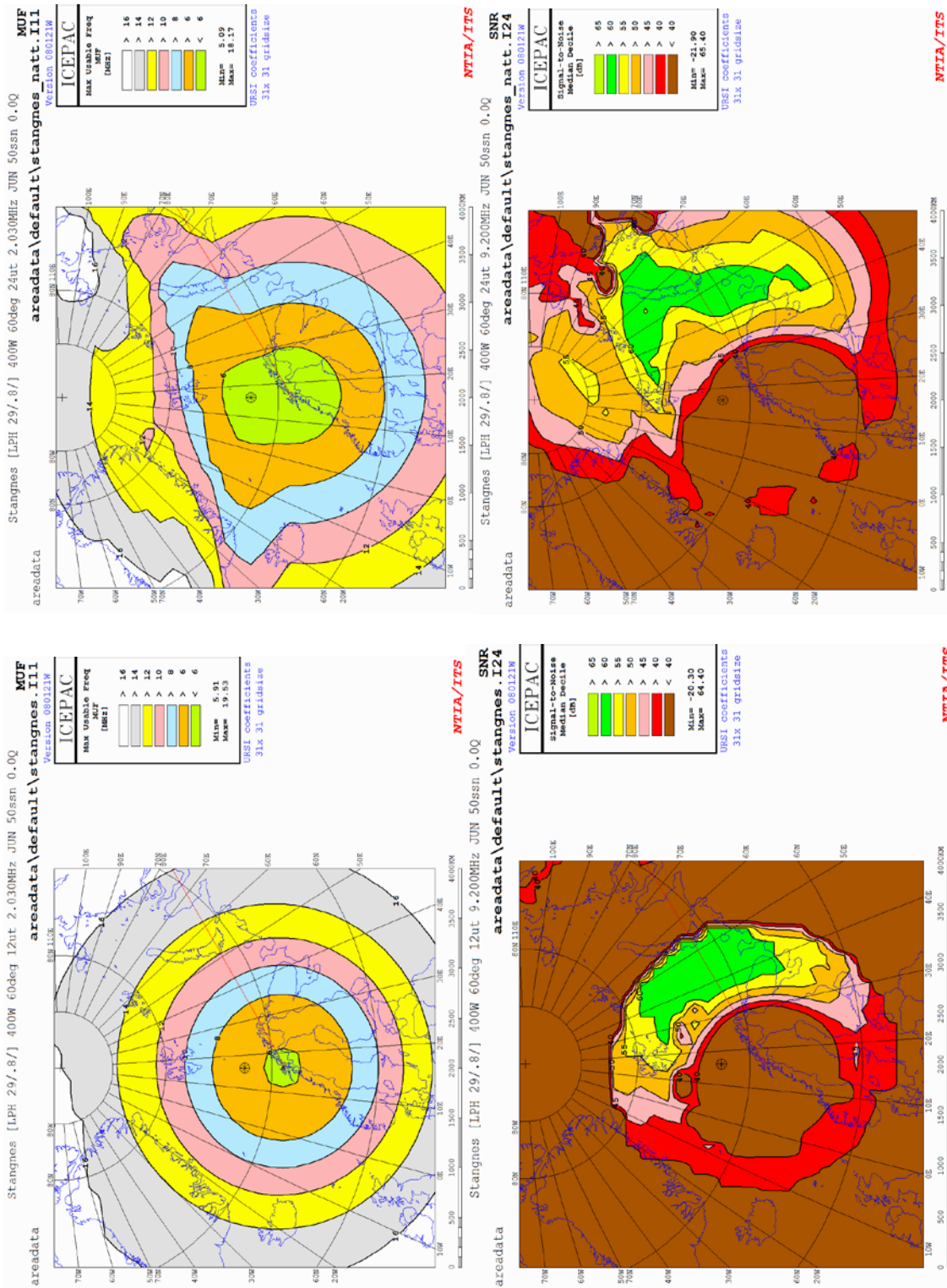
4.7 Frekvensvalg

Noen prediksjoner [ICEPAC, referanse 8] av Maximum Usable Frequency (MUF) og SNR fra Stangnes og utover i Norskehavet/Barentshavet med vår utstyrskonfigurasjon er vist først i denne seksjonen. I Figur 4.13 (til venstre i portrettmodus) vises MUF for hele området ved henholdsvis middag og midnatt i juni måned 2015 og uforstyrret ionosfære. Vi ser at MUF for Svalbardområdet ligger mellom 8 og 12 MHz, og vi har også i samme figur vist prediksjon av SNR for den frekvensen som ga det høyeste SNR rundt Svalbard, nemlig 9 MHz. På vår laveste frekvens 2 MHz viste prediksjonene ingen dekning, men på 4 MHz er prediktert SNR som vist i Figur 4.14.

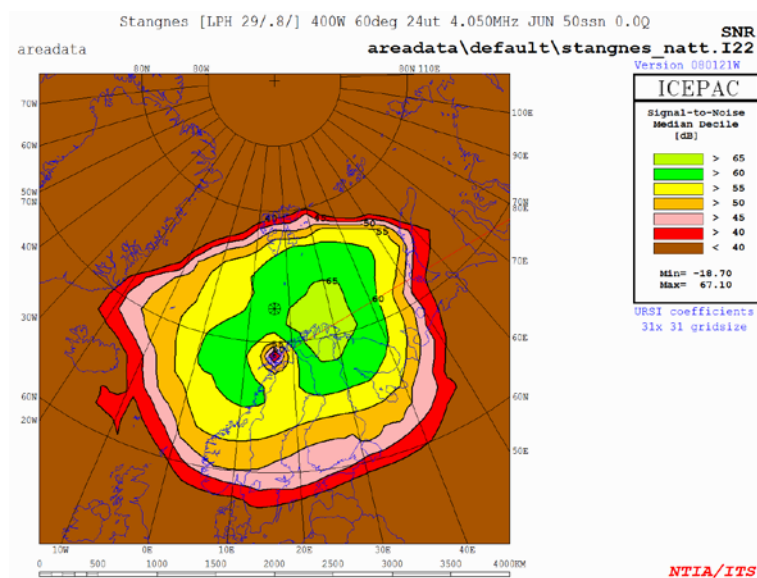
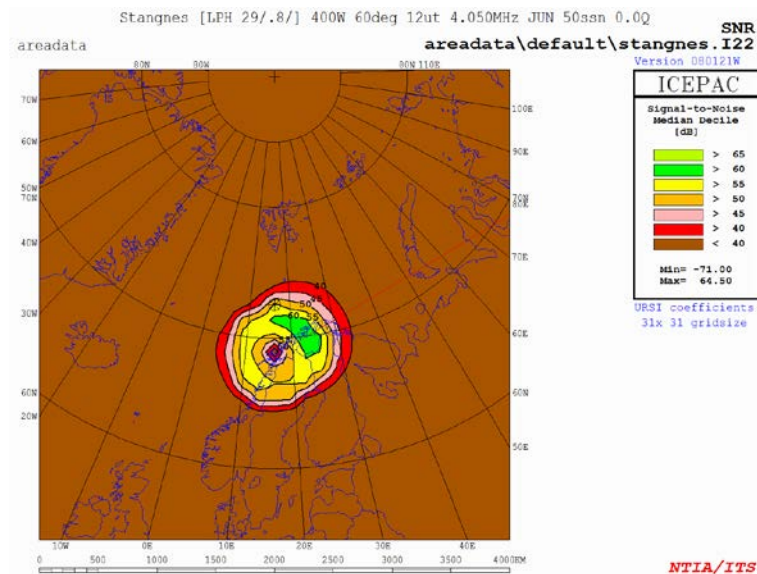
Prediksjoner for desember måned var ikke mulig å kjøre med ICEPAC (programvarefeil), så den mest nærliggende prediksjonen vi fikk til å kjøre var for oktober måned. I Figur 4.15 er vist tilsvarende som i Figur 4.13 for oktober, men SNR er plottet for 4 MHz i stedet for 9 MHz. I MUF-plottet er 4 MHz en mere troverdig frekvens enn 9 MHz for midnatt i oktober. Vi ser i denne figuren en stor forskjell i MUF prediksjonene for dag og natt. Vi tror at en dagprediksjon for desember (som vi ønsket oss) hadde vært mer lik prediksjonen vi ser for midnatt i oktober. I den påfølgende figuren har vi vist SNR prediksjonene for 9 MHz, som vil ligge over MUF på natten.

Prediksjon for strekket Helgelandsmoen-Haakonsværn gir en MUF på 6-8 MHz ved middag og 4-6 MHz ved midnatt for april måned og under uforstyrrede ionosfæreforhold. Frekvensen 4 MHz gir best prediktert SNR midt på dagen og 3 MHz ved midnatt.

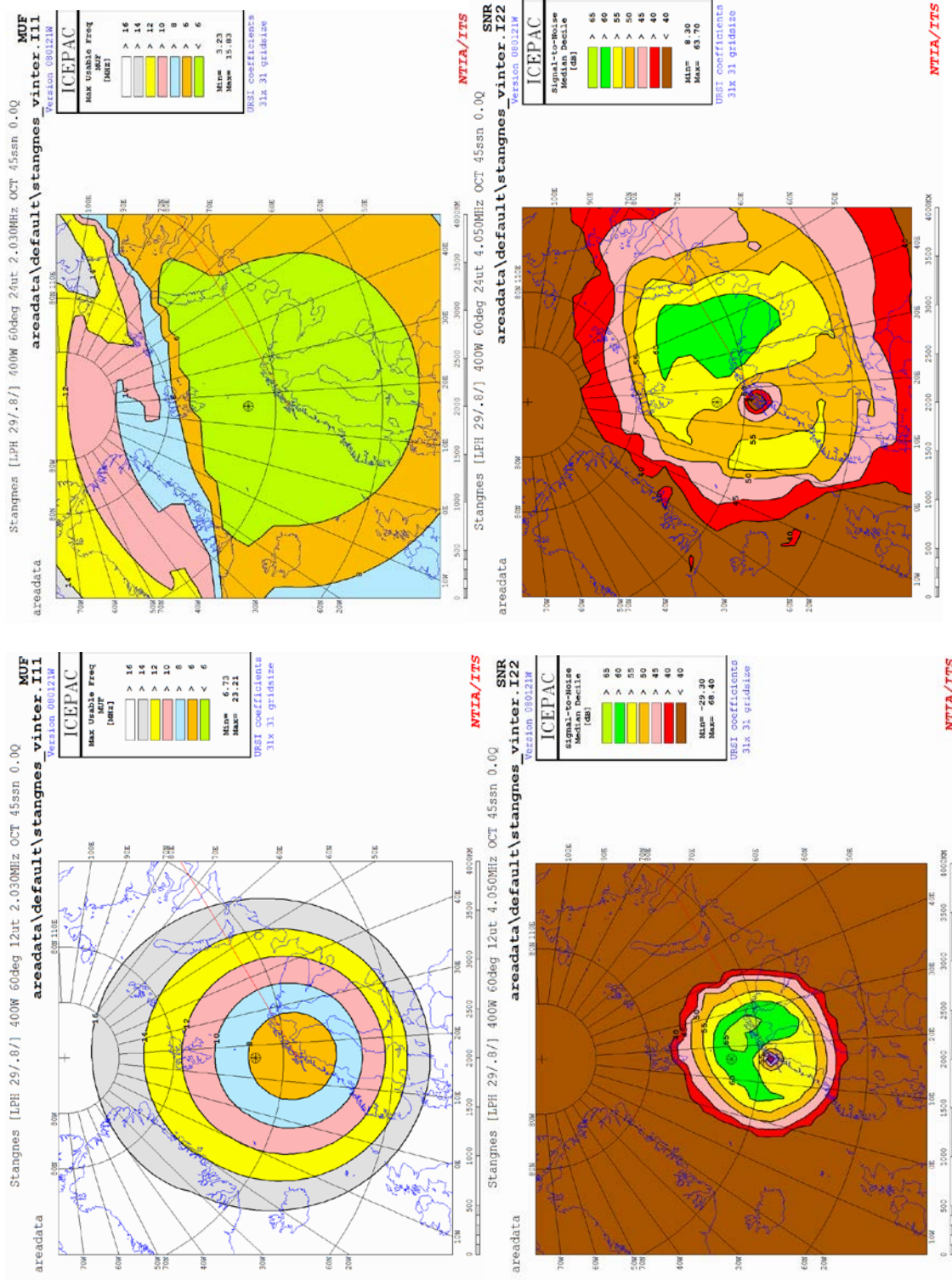
Prediksjonene gir stort sett fornuftige resultater i henhold til teorien for radiobølgeutbredelse. Men det er verdt å merke seg at prediksjoner for 2 MHz aldri ga gode resultater på noe tidspunkt, noe som er i motsetning til det som ble målt og beskrives i det følgende. En årsak til den pessimistiske prediksjonen på 2 MHz kan skyldes at antennen valgt fra ICEPACs antennebibliotek (vertikal log-periodisk) stemmer dårlig overens med den reelle antenneinstallasjonen brukt under målingene på den laveste frekvensen.



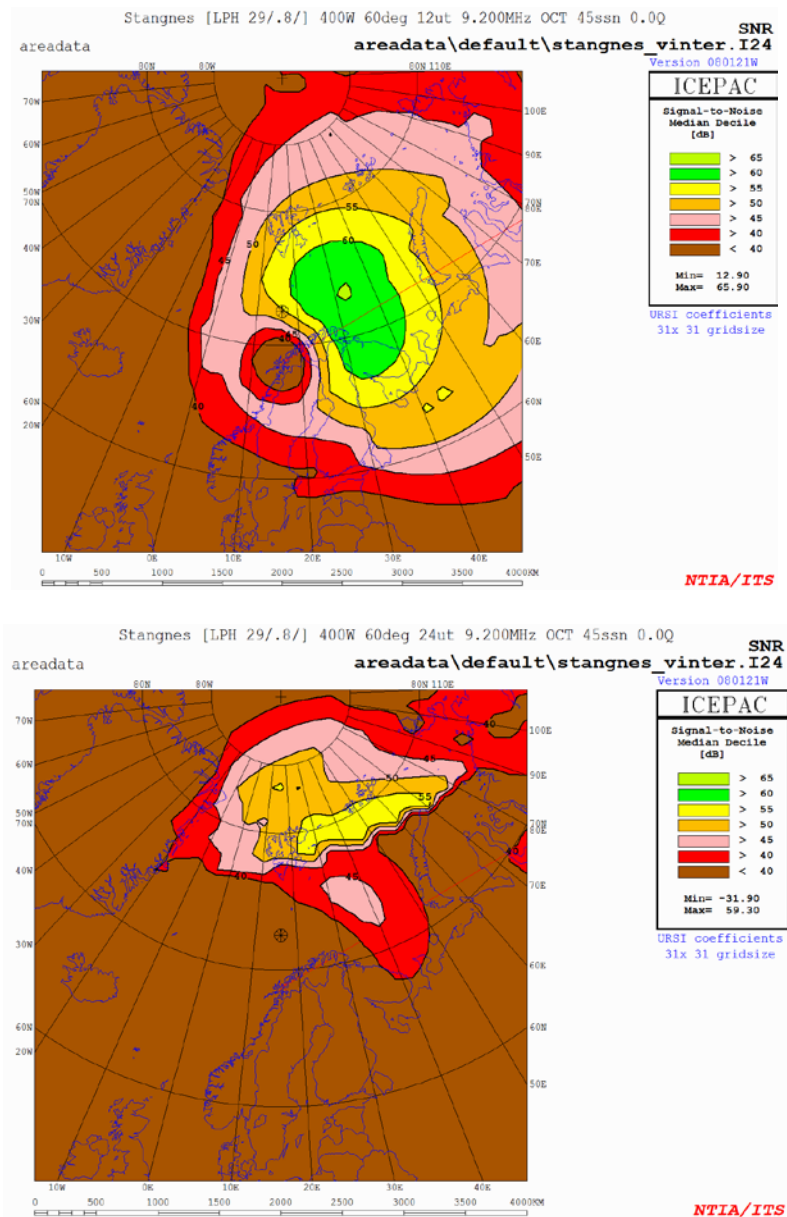
Figur 4.13 ICEPAC prediksjon av MUF (til venstre) og SNR på 9 MHz (til høyre) fra Stangnes til havområdene i nord. Juni 2015, middag nederst og midnatt øverst



Figur 4.14 ICEPAC prediksjon av SNR på 4 MHz med samme linkparametere som i forrige figur. Middag øverst og midnatt nederst



Figur 4.15 ICEPAC prediksjon av MUF (til venstre) og SNR på 4 MHz (til høyre) fra Stangnes til havområdene i nord. Oktober 2015, middag nederst og midnatt øverst



Figur 4.16 ICEPAC prediksjon av SNR på 9 MHz med samme linkparametere som i forrige figur. Middag øverst og midnatt nederst

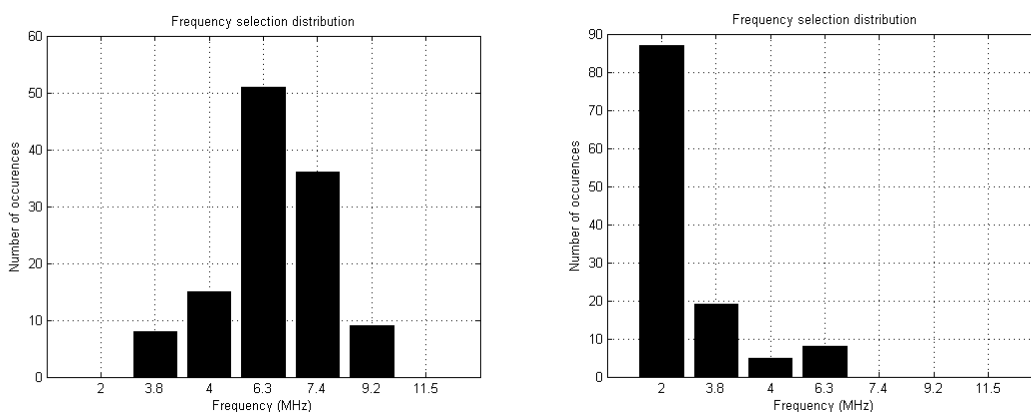
Vi har analysert fordelingen av frekvensvalgene som radioene har gjort i de forskjellige periodene. På strekningen Helgelandsmoen-Haakonsværn i april måned er det forskjell på frekvenser brukt på dag og natt, og fordelingene er vist i Figur 4.17. Laveste frekvens 2 MHz er mest brukt på natten mens 6 MHz er den beste frekvensen på dagtid. Denne trenden stemmer bra med prediksjonene bortsett ifra at prediksjoner for 2 MHz var konsekvent svært pessimistisk i prediksjonsprogrammet.

På strekket til fartøyet når det befinner seg rundt Svalbard på sommeren, er det også en viss forskjell mellom dag og natt med 9 MHz som den hyppigst valgte frekvensen om dagen og 2 MHz om natten (Figur 4.18). Dette stemmer også bra med prediksjonen (bortsett ifra 2 MHz som nevnt tidligere).

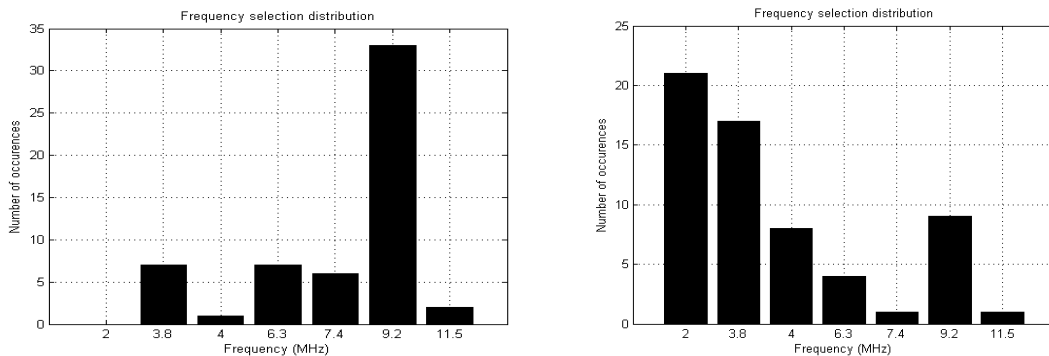
Frekvensbruken er annerledes på vinteren på det samme strekket. I disse målingene er det en tydelig preferanse for den laveste frekvensen 2 MHz i alle periodene vi har analysert. Her er heller ingen forskjell i fordelingen mellom dag og natt (Figur 4.19). Det er dårlig overensstemmelse mellom data og prediksjoner for vinteren. Prediksjonen for dag antyder at frekvenser opp imot 9 MHz er best, mens prediksjonen for natt viser rett trend med at lavere frekvenser er best, men igjen så feiler prediksjonen totalt på 2 MHz. Resultatet var noe annerledes for den motsatte senderretningen fra fartøyet til landstasjonen, se Seksjon 4.10.

For avstander i nord mindre enn 700 km der jordbølgen er dominerende, er alltid den laveste frekvensen 2 MHz mest brukt. Generelt var 2 MHz en svært god frekvens i dette området.

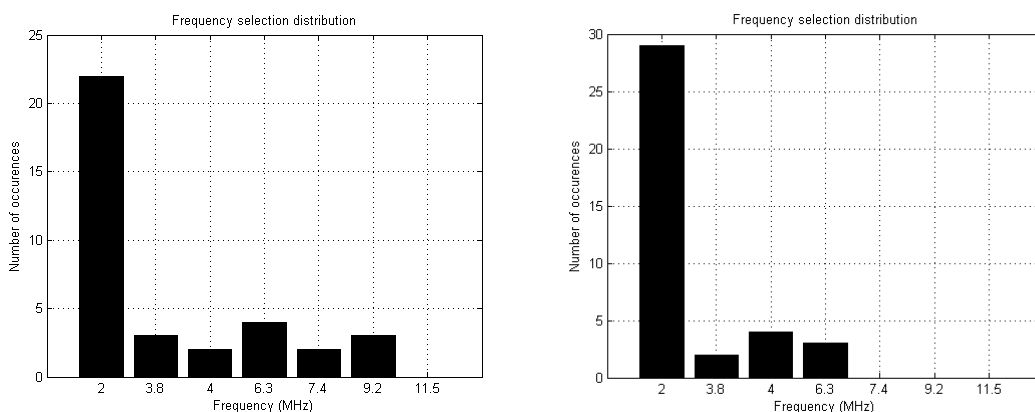
Geomagnetisk aktivitet har lite å si for frekvensfordelingen i våre målinger.



Figur 4.17 Fordeling av valgt frekvens på Helgelandsmoen-Haakonssvern splittet opp i dagmålinger til venstre og nattmålinger til høyre. Mars-april 2015, rolige ionosfæreforhold, samme 15 dager som i Figur 4.1



Figur 4.18 Fordeling av valgt frekvens på avstander rundt 1000 km splittet opp i dagmålinger til venstre og nattmålinger til høyre. Mai-juni 2015, rolige ionosfæreforhold, samme 9 dager som i Figur 4.2



Figur 4.19 Fordeling av valgt frekvens på avstander rundt 1000 km splittet opp i dagmålinger til venstre og nattmålinger til høyre. Januar 2016, rolige ionosfæreforhold, samme 5 dager som i Figur 4.3

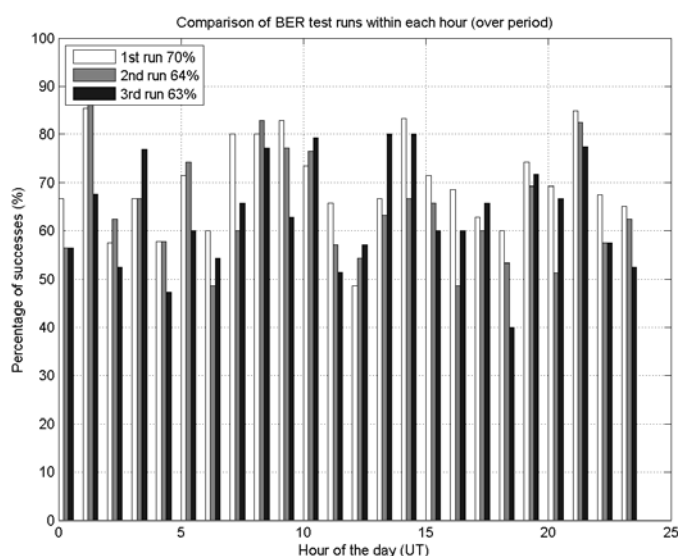
4.8 Oppdateringsbehov av kanalvalg

I våre automatiserte målinger ble det kjørt et nytt kanalsøk og valg av frekvens og båndbredde en gang i timen. Valget av frekvens og båndbredde ble beholdt gjennom hele den påfølgende timen. Vi har analysert målingene for å finne ut om dette valget ble utdatert i løpet av timen og om behovet for oppdatering av kanalvalg egentlig er større enn én gang i timen.

I denne analysen ble samlet suksessrate fra de første fem testene (forskjellige bølgeformer) sammenlignet med samlet suksessrate fra de neste fem testene og også samlet suksessrate av de siste fem testene. Tidsavstanden mellom første verdi og tredje (og siste) verdi vil være cirka 40 minutter for sommermålingene og 30 minutter for vintermålingene og derfor ikke utgjøre en hel

time. Et eksempel på en slik sammenligning er vist i Figur 4.20 som for hver time viser total suksessrate for første kjøring av de fem testene (hvit stolpe), andre kjøring av de fem testene (grå kolonne) og tredje kjøring av de fem testene (svart kolonne). Eksempelen viser at suksessraten gikk ned fra 70 til 63 % i løpet av cirka 40 minutter.

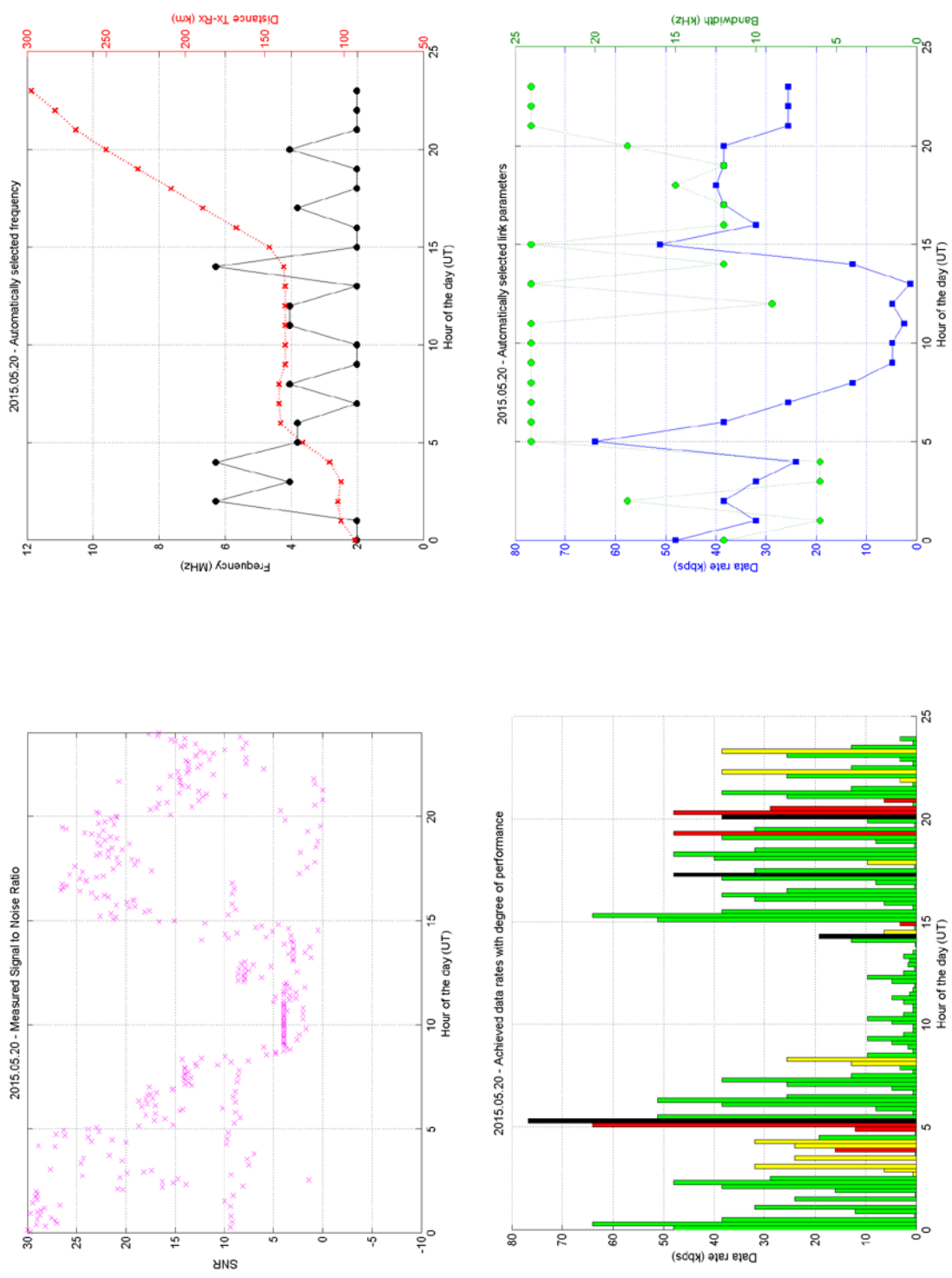
Sommerperiodene viste den største degradasjon av suksessrate med 3-9 % i løpet av 40 minutter. Vintermålingene og målinger der jordbølgeutbredelse var dominerende, degraderte med under 5 %. Det var ingen merkbar forskjell mellom tid på døgnet og geomagnetisk tilstand av ionosfæren. En oppdatering av kanalforhold én gang i timen bør dermed være bra nok for et adaptivt HF system.



Figur 4.20 Suksessrater for Stangnes-KV Svalbard sortert på perioder innen testsyklusen, 9 dager, samme periode som i Figur 4.2

4.9 Kortholds-HF langs kysten

Målinger ble også gjort når fartøyet befant seg nære kysten mot nord, under 150 km fra senderen på Stangnes. Forholdene synes å være en blanding av svært gode forhold representert ved en stabil jordbølge som gir høyt SNR og høy datahastighet, og svært dårlige forhold når fartøyet ligger til kai i Tromsø. Det kan virke som SNR blir svært lavt i Tromsø på grunn av økt støynivå. Båndbredde på 24 kHz er ofte valgt, så interferens synes ikke å være et problem. Et typisk forløp for kommunikasjonen ved en kort stopp i Tromsø er vist i Figur 4.21. For de timene fartøyet ligger i Tromsø, prøver radioene noen forskjellige frekvenser, båndbredden velges vanligvis høy, men SNR er lavt og derfor velges en lav datahastighet. Den høye båndbredden tas ut i form av økt robusthet for kommunikasjonen, og sambandet opprettholdes men med en lav hastighet. Tilsvarende fenomen ble registrert ved gjentatte besøk i Tromsø både sommer og vinter.



Figur 4.21 Data for en enkeltdag, 20/5-2015. Avstander mellom 80 og 300 km. Besøk i Tromsø mellom kl 9 og 14 UT.

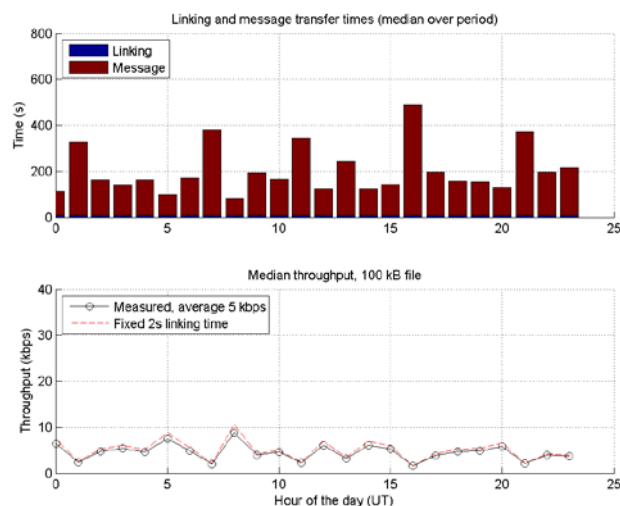
4.10 Transmisjon fra fartøy til land

På tampen av målingene fikk vi lov til å gjøre et kortvarig forsøk med å snu senderretningen, det vil si at fartøyet tok initiativ til all kommunikasjonen. Dette er jo en minst like interessant operativ situasjon. De endrede forutsetningene er dermed at det er en rundstrålende piskantenne som nå er sender-antenne og den vertikale log-periodiske antennen på land er mottaker-antenne. Støysituasjonen kan være forskjellig på mottakersiden, så det er en viss sannsynlighet for at resultatene kan være forskjellige i motsatt retning.

Å snu senderretningen ved bare å bytte script som styrte testene uten å ha prøvd dette på forhånd, viste seg å ikke bli helt vellykket. Alle bitfeil-testene ble ikke lagret. Derimot fikk vi vellykkede målinger av frekvens, båndbredde, valgt datahastighet og overføringskapasitet for meldinger.

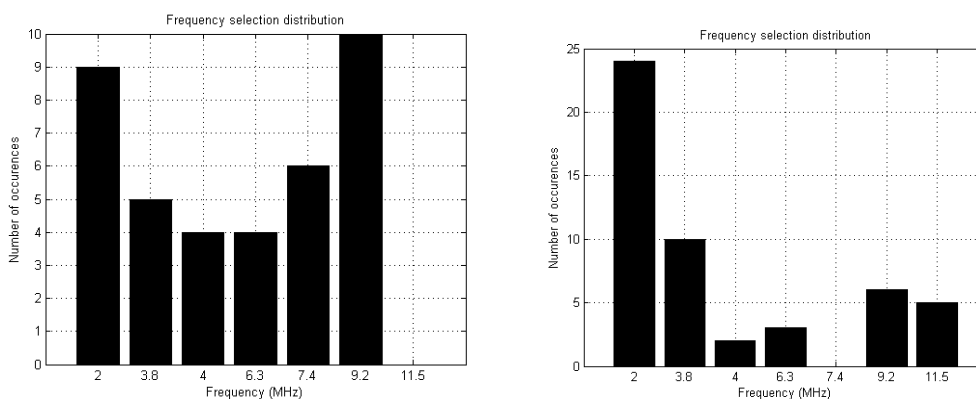
I hele denne måleperioden i februar og mars 2016 befant fartøyet seg i områdene rundt Svalbard, så målinger finnes bare for avstander > 900 km. Vi delte målingene opp i tre grupper basert på geografisk plassering; 1) rundt Svalbard, 2) svært langt mot nord, dvs rundt 1500 km fra Stangnes (= 500 km nord for Longyearbyen), og 3) langt mot øst, dvs rundt 1000 km fra Stangnes, og øst for Vardø i lengdegrad.

Overføringskapasiteten målt for en 100 kB melding var lik den som ble målt i motsatt retning og referert i Seksjon 4.6. Resultatene var svært like for de tre områdene. Et eksempel fra området rundt Svalbard er vist i Figur 4.22. Vi antar dermed at BER-testene også ville ha vist samme resultat som i motsatt retning.



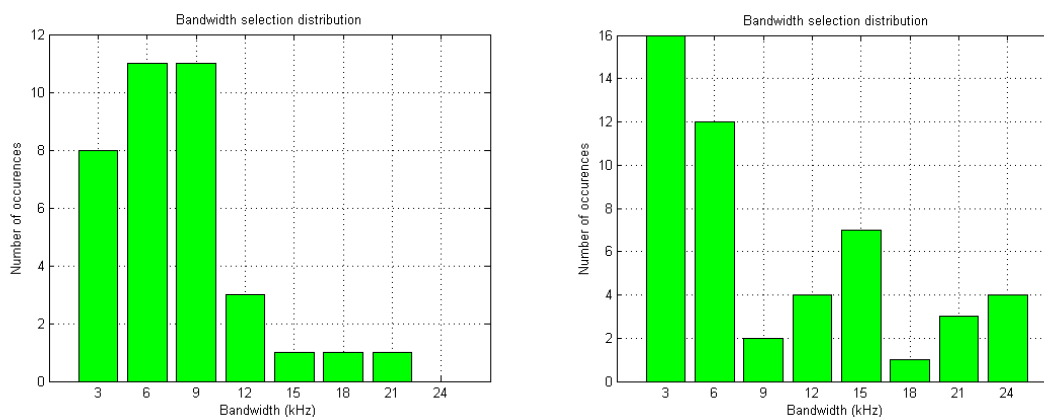
Figur 4.22 Målt overføringskapasitet på applikasjonsnivå, avstander rundt 1000 km, februar 2016, geomagnetisk rolige forhold, 9 dager midlet

Frekvensbruken i dette datasettet er forskjellig fra det som ble målt en måned før med motsatt senderretning. Her blir høyere frekvenser favorisert på dagtid, mens 2 MHz blir mest valgt på nattestid. Dette ligner mer på det som ble målt på sommeren med motsatt senderretning, se Figurene 4.18 og 4.19. Det er vanskelig å si om denne forskjellen skyldes snudd senderretning eller at solforholdene og dermed ionosfæren har endret seg fra januar til februar.



Figur 4.23 Fordeling av valgt frekvens på avstander rundt 1000 km splittet opp i dagmålinger til venstre og nattmålinger til høyre. Februar 2016, rolige ionosfæreforhold, 9 dager

Båndbreddebruken er også noe forskjellig fra det som ble målt en måned før i motsatt senderretning. Vi observerer her ingen stor forskjell i båndbreddebruk mellom dag og natt (se Figur 4.24), i motsetning til det som ble målt en måned før (Figur 4.11). Observasjonene er igjen mer like de som ble gjort på sommerstid i motsatt retning.



Figur 4.24 Fordeling av valgt båndbredde på avstander rundt 1000 km splittet opp i dag og natt. Dagsmålinger til venstre, nattmålinger til høyre. Februar 2016, rolige ionosfæreforhold, 9 dager

5 Konklusjoner

Eksperimentet har gitt ny kunnskap for bruk av HF kommunikasjon i nordområdene. Resultatene må ansees som trender for HF kommunikasjonen i nord, og ikke som absolutte sannheter, gyldige til enhver tid. Det empiriske grunnlaget for å trekke konklusjoner er noe svakt, gitt HF kanalens variasjonssyklus basert på timer, måneder og 11-års solflekksyklus. Ut i fra målingene som er gjort, kan vi si:

Adaptiv HF der radioutstyret selv tilpasser seg de varierende kanalforholdene antas å gi stor operativ gevinst ved at sambandet opprettholdes til enhver tid selv om datakapasiteten som tilbys vil variere med kanalforholdene. En datalinkprotokoll med Automatic Repeat Request (ARQ) vil sørge for denne adaptiviteten. Målingene verifiserte at økt tilgjengelig båndbredde blir tatt ut som gevinst enten i form av økt datahastighet eller som mer robust kommunikasjon med lavere datahastighet.

De nye bølgeformene i Mil-Std 188-110C Appendix D som bruker varierende båndbredde opp til 24 kHz, gir en gjennomsnittlig økt datakapasitet i arktiske strøk i forhold til tradisjonell 2G/3G teknologi i 3 kHz båndbredde. Med sender på Stangnes og mottaker i områder rundt Svalbard var den målte overføringskapasiteten på fysisk lag cirka 20 kb/s (middelverdi over hele døgnet) på sommerstid og cirka 10 kb/s på vinterstid når ionosfæren var uforstyrret. Litt høyere hastighet oppnås på nattetid enn på dagtid. Variasjoner rundt dette forekommer avhengig av geomagnetiske forhold, absorpsjonsforhold i ionosfæren, støy og interferens. På et 278 km langt strekk i sør ble midlere datahastighet målt til 40 kb/s midt på dagen, men sank til 20 kb/s på natten på grunn av stor variasjon i solbelysningen på denne årstiden.

På sommerstid ble jordbølgeutbredelse observert ut til 800 km fra kysten av Norge mot nord, og i dette området ble midlere overføringskapasitet målt til cirka 30 kb/s. Målingene antyder at høyere datahastigheter enn de som ble målt, kan oppnås med jordbølgen dersom et mindre konservativt bølgeformsvalg hadde blitt gjort av radioene. Tilsvarende stort dekningsområde for jordbølgen ble ikke målt på vinterstid.

Vi summerer opp middelverdier (over døgnet) av automatisk valgte datahastigheter i forskjellige tidsperioder, geografiske områder og under forskjellige geomagnetiske forhold i Tabell 5.1. Der to verdier er angitt i tabellen, er måledøgnene sortert i to grupper fordi resultatene var såpass forskjellige i de to gruppene.

	South	Arctic	Arctic	Arctic	Arctic	Arctic	Arctic
	278 km	≈1000 km	≈1000 km	≈1000 km	600-800 km	< 650 km	150-800 km
	quiet	quiet	disturbed	very disturbed	grwave	grwave	disturbed
March-April	26						
May-June		19		13	24	32	
Oct - Jan		6 / 16	8 / 11	5			7

Tabell 5.1 *Middelverdier over døgnet (kb/s) av automatisk valgte datahastigheter i forskjellige tidsperioder, geografiske områder og under forskjellige geomagnetiske forhold*

Målingene har vist at den største overføringskapasiteten som teoretisk er mulig å oppnå med de nye bølgeformene, ikke oppnås med hverken jordbølge eller ionosfærebølge i nord. En hovedårsak til det er at båndbredden som automatisk velges av utstyret, stort sett er mindre enn 12-15 kHz, og da vil aldri de største overføringshastighetene oppnås. Men den valgte båndbredden er også oftest større enn 3 kHz som betyr at kontinuerlig båndbredde større enn 3 kHz generelt er tilgjengelig. Dermed vil overføringskapasiteten med bredbånds HF bli større enn det tradisjonell 2G/3G HF teknologi kan gi. Målingene antyder at det finnes to situasjoner for båndbreddetilgjengelighet: Enten så begrenses tilgjengelig båndbredde oppad til cirka 12 kHz, eller så finnes det "store" båndbredder på 24 kHz (eller mer?) tilgjengelig. Særlig på natten på vinterstid var 24 kHz i stor grad tilgjengelig.

6 Anbefalinger

For Forsvarets fremtidige HF kommunikasjon er adaptivitet med automatisk linketablering det aller viktigste å få på plass for alle HF brukere som kommuniserer punkt-til-punkt. Både 2G og 3G HF gir denne funksjonaliteten, og man trenger ikke implementere bredbånds HF (= 4G) for å få til dette.

Den økte overføringskapasiteten som vi har målt at bredbånds HF gir, antas å gi økt operativ nytte ved bruk i arktiske områder, og det bør vurderes om fartøyer som opererer i disse områdene og som har HF som en primærbærer, bør utstyres med 4G HF. Harris sin implementasjon av bredbånds HF i RF-7800H og den kommende 300H (som inkluderer Type 1 krypto) gir kompatibilitet med eldre Harris radioer (AN-PRC 150C og RF-5800H). Slik bakoverkompatibilitet tilstrebes også i den kommende standarden for bredbånds-HF. Det er derfor ingenting i veien for at bare enkelte HF brukere kan utstyres med bredbåndskapasitet, og likevel være kompatible med andre brukere som bare har 2G/3G teknologi.

Mer enn 3 kHz kontinuerlig båndbredde er tilgjengelig i de områder det er målt og gir økt datahastighet. Om større hastigheter kan bli oppnådd med ikke-kontinuerlig spektrumsbruk som er et fransk forslag til bredbånds-standard, er ikke målt i denne studien, men interferenssituasjonen synes ikke å være prekær. 24 kHz båndbredde ble hyppig valgt. Faktisk bør industrien vurdere om enda større båndbredder bør kunne velges.

I områder der jordbølgeutbredelse på HF er mulig å få til, vil den største gevinsten av 4G HF kunne hentes ut. Opp til 50 kb/s datahastighet på visse tider av døgnet på en relativt stabil sambandsbærer er et stort sprang fra dagens HF systemer. Dette bør kunne utnyttes av Forsvaret. Industrien bør se på om radioene kan gjøre enda mer “offensive” valg av datahastigheter når kanalen er svært god ved jordbølgetransmisjon.

Siden ionosfærekanalen er svært dynamisk på høy breddegrad og endrer seg avhengig av tid og sted, er det mulig å utnytte HF bedre i et nettverk av HF noder enten landbaserte eller sjøplattformbaserte. Nodene kan rute trafikken for hverandre og dermed sikre bedre fremkommelighet. Dette gjelder både 2G, 3G og 4G HF teknologi. Det anbefales at Forsvaret undersøker denne muligheten.

Referanser

- [1] Jodalen V, Mjelde T M, Sander J, Batts W, “All results from wideband HF measurements in the Arctic 2015-16”, FFI-notat 16/00569, 2016
- [2] Mjelde T M, “Automatisert testing av Harris RF-7800H-MP HF radio”, FFI-notat 16/00255, 2016
- [3] Jodalen V, Mjelde T M, Batts W, “Wideband HF in the Arctic”, Conference Proceedings, Nordic Shortwave Conference 2016, Fårø, Sweden, 2016
- [4] Jodalen V, “An evaluation of wideband HF and its potential at high latitudes”, FFI-rapport 14/01921
- [5] Furman W N, Nieto J W, Koski E N, “Initial wideband HF ALE: Approach and on-air test results”, Conference Proceedings, Nordic Shortwave Conference 2013, Fårø, Sweden, 2013
- [6] Geomagnetic index A: <http://www.swpc.noaa.gov/products/planetary-k-index>

-
-
- [7] Data fra Longyearbyen Imaging Riometer, <http://spears.lancs.ac.uk/cgi-bin/riometers?height=90;year=1998;id=7> , kontakt: Peter Stauning, epost pst@dmi.dk
- [8] Prediksjonsprogrammet ICEPAC, <http://elbert.its.blrdoc.gov/hf.html>

Forkortelser

ALE	- Automatic Link Establishment
ARQ	- Automatic Repeat reQuest
BER	- Bit Error Rate
BPSK	- Binary Phase Shift Keying
CD&E	- Concept Development and Experimentation
HF	- High Frequency
MUF	- Maximum Usable Frequency
QAM	- Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	- Quadrature Phase Shift Keying
SNR	- Signal to Noise Ratio
UT	- Universal Time
WB ALE	- WideBand ALE
WMT	- Wireless Messaging Terminal

About FFI

The Norwegian Defence Research Establishment (FFI) was founded 11th of April 1946. It is organised as an administrative agency subordinate to the Ministry of Defence.

FFI's MISSION

FFI is the prime institution responsible for defence related research in Norway. Its principal mission is to carry out research and development to meet the requirements of the Armed Forces. FFI has the role of chief adviser to the political and military leadership. In particular, the institute shall focus on aspects of the development in science and technology that can influence our security policy or defence planning.

FFI's VISION

FFI turns knowledge and ideas into an efficient defence.

FFI's CHARACTERISTICS

Creative, daring, broad-minded and responsible.

Om FFI

Forsvarets forskningsinstitutt ble etablert 11. april 1946. Instituttet er organisert som et forvaltningsorgan med særskilte fullmakter underlagt Forsvarsdepartementet.

FFIs FORMÅL

Forsvarets forskningsinstitutt er Forsvarets sentrale forskningsinstitusjon og har som formål å drive forskning og utvikling for Forsvarets behov. Videre er FFI rådgiver overfor Forsvarets strategiske ledelse. Spesielt skal instituttet følge opp trekk ved vitenskapelig og militærteknisk utvikling som kan påvirke forutsetningene for sikkerhetspolitikken eller forsvarsplanleggingen.

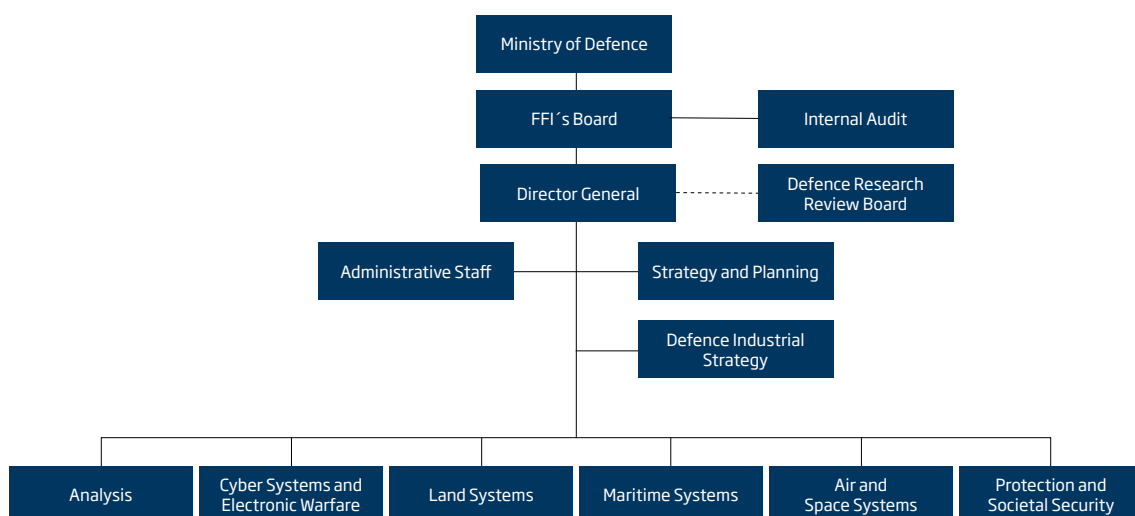
FFIs VISJON

FFI gjør kunnskap og ideer til et effektivt forsvar.

FFIs VERDIER

Skapende, drivende, vidsynt og ansvarlig.

FFI's organisation



Forsvarets forskningsinstitutt
Postboks 25
2027 Kjeller

Besøksadresse:
Instituttveien 20
2007 Kjeller

Telefon: 63 80 70 00
Telefaks: 63 80 71 15
Epost: ffi@ffi.no

Norwegian Defence Research Establishment (FFI)
P.O. Box 25
NO-2027 Kjeller

Office address:
Instituttveien 20
N-2007 Kjeller

Telephone: +47 63 80 70 00
Telefax: +47 63 80 71 15
Email: ffi@ffi.no