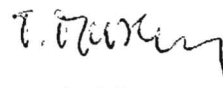


FFIE/742/110

Godkjent
Kjeller 17 november 1998



Torleiv Maseng
Forskningssjef

**EVALUERING AV HF-MODEMER OG
FLERFREKVENSSYSTEMER BASERT PÅ
KANALMÅLINGER PÅ HØYE
BREDDEGRADER**

BERGSVIK Torgeir

FFI/RAPPORT-98/04983

FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT
Norwegian Defence Research Establishment
Postboks 25, 2007 Kjeller, Norge

NORWEGIAN DEFENCE RESEARCH ESTABLISHMENT (NDRE)
FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT (FFI)

UNCLASSIFIED

POST OFFICE BOX 25
N-2007 KJELLER, NORWAY

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
(when data entered)

REPORT DOCUMENTATION PAGE

1) PUBL/REPORT NUMBER FFI/RAPPORT-98/04983 1a) PROJECT REFERENCE FFIE/742/110	2) SECURITY CLASSIFICATION UNCLASSIFIED 2a) DECLASSIFICATION/DOWNGRADING SCHEDULE	3) NUMBER OF PAGES 96		
4) TITLE EVALUERING AV HF-MODEMER OG FLERFREKVENS SYSTEMER BASERT PÅ KANALMÅLINGER PÅ HØYE BREDDEGRADER (HF-MODEM PERFORMANCE EVALUATION BASED ON MEASUREMENTS OF THE HF CHANNEL AT HIGH LATITUDES)				
5) NAMES OF AUTHOR(S) IN FULL (surname first) BERGSVIK Torgeir				
6) DISTRIBUTION STATEMENT Approved for public release. Distribution unlimited. (Offentlig tilgjengelig)				
7) INDEXING TERMS IN ENGLISH: <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> a) <u>HF radio propagation</u> b) <u>Channel characterisation</u> c) <u>Modem availability</u> d) <u>Communications availability</u> e) <u>DAMSON</u> </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> IN NORWEGIAN: a) <u>HF radiobølgeforplantning</u> b) <u>Kanalkarakterisasjon</u> c) <u>Modem tilgjengelighet</u> d) <u>Kommunikasjonstilgjengelighet</u> e) <u>DAMSON</u> </td> </tr> </table>			a) <u>HF radio propagation</u> b) <u>Channel characterisation</u> c) <u>Modem availability</u> d) <u>Communications availability</u> e) <u>DAMSON</u>	IN NORWEGIAN: a) <u>HF radiobølgeforplantning</u> b) <u>Kanalkarakterisasjon</u> c) <u>Modem tilgjengelighet</u> d) <u>Kommunikasjonstilgjengelighet</u> e) <u>DAMSON</u>
a) <u>HF radio propagation</u> b) <u>Channel characterisation</u> c) <u>Modem availability</u> d) <u>Communications availability</u> e) <u>DAMSON</u>	IN NORWEGIAN: a) <u>HF radiobølgeforplantning</u> b) <u>Kanalkarakterisasjon</u> c) <u>Modem tilgjengelighet</u> d) <u>Kommunikasjonstilgjengelighet</u> e) <u>DAMSON</u>			
THESAURUS REFERENCE:				
8) ABSTRACT The high latitude HF channel has been measured and characterised in terms of Doppler spread, delay spread and signal-to-noise ratio. This is done by the Doppler And Multipath Sounding Network developed(DAMSON) by DERA in conjunction with CRC, FOA and FFI. The performance of data modems compliant with STANAG 4285 (2400 bps mode, non-robust) and STANAG 4415 (75 bps mode, robust) has been determined over a comprehensive range of simulated channel conditions. A comparison is made between the channel measurements and the modem characterisations, and modem availabilities during the measured channel conditions are determined. The robust modem shows 50-70 % higher availability than the non-robust modem on the measured paths. The most important factor contributing to modem failure is low signal-to-noise ratio. This report also addresses the number of frequencies required for a HF circuit to achieve maximum communications availability. Results from all DAMSON paths show that STANAG 4285 requires 6-8 frequencies whereas the STANAG 4415 modem reaches maximum availability with 2-3 frequencies.				
9) DATE 17 November 1998	AUTHORIZED BY This page only Torleiv Maseng	POSITION Director of Research		

ISBN 82-464-0311-7

UNCLASSIFIED

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
(when data entered)

INNHOOLD

		Side
1	INNLEDNING	6
2	KANALKARAKTERISTIKK AV HF	7
2.1	Ionosfæren	7
2.2	Radiobølgeutbredelse	10
2.3	Signalspredninger	11
2.4	Partikkelnedbør og forstyrrelser	12
2.5	Prediksjoner og ICEPAC	14
3	DAMSON PROSJEKTET	15
3.1	Prosjektets formål	15
3.1.1	Vurdering av HF-modem bølgeformer	16
3.1.2	Oppdatering av prediksjonskoder	16
3.1.3	HF-simulatorer	17
3.2	Systembeskrivelse	17
3.2.1	Doppler-Delay bølgeform	17
3.2.2	Andre bølgeformer	18
3.3	DAMSON data-analyse	19
3.4	Bearbeidede DAMSON data	20
3.4.1	Signal til støy forhold	20
3.4.2	Kompositt frekvensspredning	21
3.4.3	Kompositt tidsspredning	21
4	VIRKEMÅTE OG YTELSE TIL HF MODEMER	21
4.1	STANAG 4415, 75 bps, Long interleaving	22
4.1.1	Virkemåte	22
4.2	STANAG 4285, 2400 bps, Long interleaving	22
4.2.1	Virkemåte	23
4.3	Ytelsessimulering	23
5	PROBLEMSTILLING	26
6	FREKVENS- OG MODEMTILGJENGELIGHET	26
6.1	Hvordan beregne en bølgeforms tilgjengelighet	27
6.2	Vurdering av feilende kanalparameter	28

6.2.1	STANAG 4285 (2400 bps)	29
6.2.2	STANAG 4415 (75 bps)	32
7	RESULTATER FRA FREKVENSTILGJENGELIGHET	34
7.1	Harstad - Kiruna	34
7.1.1	Oversikt over målte kanalparametere i perioden	35
7.1.2	Modemtilgjengelighet for perioden	37
7.1.3	Feilende kanalparameter	39
7.1.4	Diskusjon	41
7.2	Isfjord – Lycksäle	41
7.2.1	Oversikt over målte kanalparametere i perioden	42
7.2.2	Modemtilgjengelighet i perioden	43
7.2.3	Feilende kanalparameter	46
7.2.4	Diskusjon	47
7.3	Harstad - Tuentangen	47
7.3.1	Oversikt over målte kanalparametere i perioden	48
7.3.2	Modemtilgjengelighet i perioden	49
7.3.3	Feilende kanalparameter	52
7.3.4	Diskusjon	53
7.4	Isfjord – Tuentangen	53
7.4.1	Oversikt over målte kanalparametere i perioden	53
7.4.2	Modemtilgjengelighet i perioden	55
7.4.3	Feilende kanalparameter	58
7.4.4	Diskusjon	59
8	FLERFREKVENSTILGJENGELIGHET	59
8.1	DAMSON-data og flerfrekvenstilgjengelighet	59
8.2	Frekvensrangering med ICEPAC	60
8.3	Hvordan beregne flerfrekvenstilgjengelighet	60
9	RESULTATER FRA FLERFREKVENSTILGJENGELIGHET	62
9.1	Flerfrekvenstilgjengelighet på Harstad-Kiruna banen	63
9.1.1	Diskusjon	65
9.2	Flerfrekvenstilgjengelighet på Isfjord-Lycksäle banen	66
9.2.1	Diskusjon	68
9.3	Flerfrekvenstilgjengelighet på Harstad–Tuentangen banen	68
9.3.1	Diskusjon	70
9.4	Flerfrekvenstilgjengelighet på Isfjord–Tuentangen banen	71
9.4.1	Diskusjon	73
10	OPPSUMMERING OG KONKLUSJON	74
	Litteratur	77

APPENDIKS

A	EKSEMPEL PÅ PREDIKSJON UTFØRT MED ICEPAC	79
B	DEFINISJONER OG FORKORTELSER	81
C	ARTIKKEL AKSEPTERT TIL NORDISK HF KONFERANSE 1998	83
	Fordelingsliste	95

EVALUERING AV HF-MODEMER OG FLERFREKVENSSTYPEMER BASERT PÅ KANALMÅLINGER PÅ HØYE BREDDERADER

1 INNLEDNING

Radiobølgeforplantning i HF-båndet kan skje med hjelp av flere forskjellige mekanismer. Dette kan være jordbølgeforplantning, direkte-bølger gjennom luften eller ionosfærisk refleksjon med ett eller flere hopp. Kanalen kan utsette radiobølgene for tidsspredning, frekvensskift, frekvensspredning og absorpsjon. Ionosfærebølgerrefleksjon på høye breddegrader er spesielt utsatt for disse effektene. Før DAMSON (Doppler And Multipath Sounding Network) prosjektet (7) ble etablert, eksisterte det lite materiale som kunne beskrive størrelsen og forekomsten av tids- og frekvensspredninger på høye breddegrader.

DAMSON prosjektets hovedoppgave er å statistisk kvantifisere spektral spredning, frekvensskift, tidsspredning og signal til støyforhold for flere baner på høye breddegrader. Det utføres målinger på 10 frekvenser i HF-båndet. Hver frekvensmåling tar 1 minutt slik at alle frekvensene måles med intervaller på 10 minutter. Måledataene danner grunnlaget for prosjektets videre målsetninger som er å definere kravspesifikasjoner til HF-modemer, forbedring av prediksjonsprogrammer og videreutvikling av ionosfæremodeller som brukes til kanalsimuleringer.

HF-modemers ytelse kan simuleres og beskrives ved forskjellige signal til støy forhold, tids- og frekvensspredning (16). Selv om modemenes ytelse beregnes under antatte kanalforhold, sier ikke resultatene noe om hvor godt modemene fungerer på gitte baner. Med DAMSON målingene og de simulerte ytelsene kan vi finne modemtilgjengelighet på DAMSON frekvensene. Modemtilgjengelighet finnes for ett robust lavrate (75 bps) modem og et ikke-robust høyhastighets (2400 bps) modem ved å sammenligne målte verdier for signal til støy forhold, tids- og frekvensspredning med flaten som beskriver modemets simulerte ytelse. Denne prosentvise tilgjengeligheten beskriver modemets tilgjengelighet i forhold til antallet målinger. I de tilfellene hvor sammenligningen viser at modemet ikke vil fungere, kan vi bestemme hvilken av de tre kanalparameterene (signal til støy forhold, frekvensspredning, tidsspredning) som er årsak til at modemet feiler.

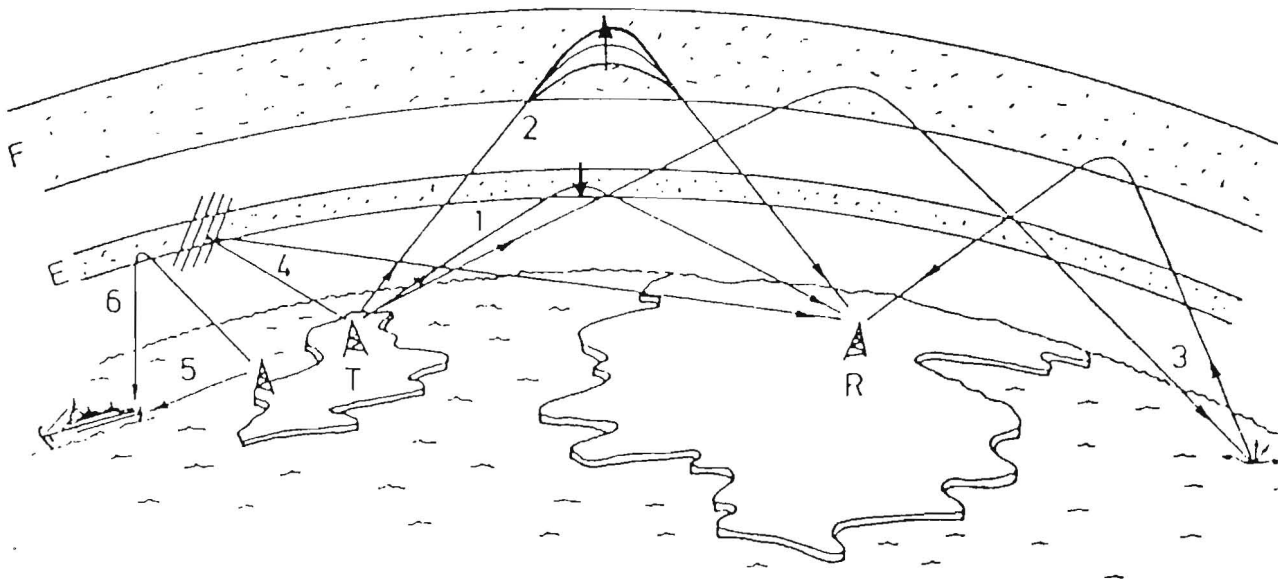
Vi ønsker også å finne modemenes tilgjengelighet i et flerfrekvenssystem med et økende antall disponible frekvenser. Et slikt system disponerer et antall frekvenser som det fritt kan bruke til samband. Vi ønsker å finne ut om det eksisterer et minimalt antall frekvenser som gir maksimal modemtilgjengelighet. I flerfrekvensanalysen blir frekvensene rangert med hjelp av HF-prediksjonsprogrammet ICEPAC (4). DAMSON målingene sorteres i forhold til tid og frekvens, og flerfrekvenstilgjengeligheten beregnes for hvert antall av disponible frekvenser (1 til 10).

En oversikt over ionosfærens oppbygning, ionosfærens forstyrrende egenskaper og HF-prediksjoner er gitt i kapittel 2. DAMSON systemet blir presentert i kapittel 3 og i kapittel 4 beskrives de to utvalgte HF-modemernes virkemåte og ytelse. Problemstillingen blir forklart i kapittel 5. I kapittel 6 blir metoden for enkeltfrekvensanalysen beskrevet og resultater presenteres i kapittel 7. Flerfrekvensanalysen forklares i kapittel 8 og resultater fra denne er presentert i kapittel 9. Til slutt er konklusjoner gitt i kapittel 10.

2 KANALKARAKTERISTIKK AV HF

2.1 Ionosfæren

Radiokommunikasjon i frekvensområdet fra 2 til 30 MHz, kjent som høyfrekvent radiokommunikasjon (HF), har den egenskapen at den kan overføre radiosignaler over svært lange avstander. Dette er beskrevet som beyond-line-of-sight (BLOS) kommunikasjon. En slik overføring er mulig ved at signalene reflekteres i ionosfæren, se figur 2.1. Under gunstige forhold kan signalene reflekteres gjentatte ganger i ionosfæren og forplantes helt rundt jordkloden. HF-bølgeutbredelse over lange avstander, er avhengig av at radiobølgene bøyes i ionosfæren tilbake mot jordoverflaten. Denne bøyningen kan best beskrives som refraksjon. Det vil si at radiobølger skifter retning som følge av endret brytningsindeks i mediet som bølgen går gjennom. HF-radiobølger kan også følge en direkte jordbølge, men denne vil ha en kort rekkevidde og vil være avhengig av områdets topografi.



Figur 2.1 Årsaker til signalspredning. Symbolene E og F representerer henholdsvis E- og F-laget. T er sender og R er mottager. Tall representerer situasjoner hvor signalspredning oppstår.

Ionosfæren er den ioniserte delen av atmosfæren som strekker seg fra 60 til 1000 km. Den er karakterisert ved at den er elektrisk ledende på grunn av frie elektroner og ioner (plasma). Denne egenskapen skyldes hovedsakelig solens elektromagnetiske stråling. Forskjellige produksjons- og tapsprosesser foregår i forskjellige høyder og resulterer i en lagstruktur.

Denne lagdelingen ligger i området 60 til 500 km og skyldes ionisering av gasser. Ionisering (elektroner som frigjøres fra atmosfæriske gasser) er den effekten som gjør det mulig å reflektere HF-signaler. Ionisering oppstår hovedsakelig på grunn av ultrafiolett stråling fra solen, men andre kilder som for eksempel kosmisk stråling vil også forårsake ionisering. Elektronene som blir frigjort på grunn av ioniseringen blir rekombinert med en bestemt rate. Ioniserings- og rekombinasjonsraten vil stort sett være i likevekt slik at det eksisterer en nesten konstant tetthet av frie elektroner. Denne ioniseringsbalansen er beskrevet i kontinuitetsligningen under.

$$\frac{dN_e}{dt} = \text{produksjon} - \text{tap}$$

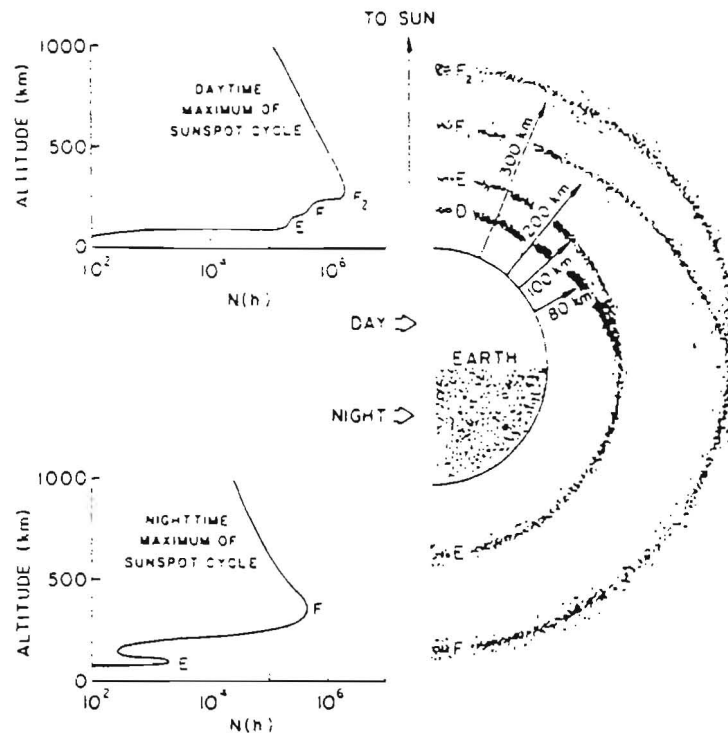
$$\frac{dN_e}{dt} = q(h, \chi) - \alpha_{\text{eff}} N_e N_+ \quad (2.1)$$

Produksjonen av frie elektroner beskrives med $q(h, \chi)$ hvor h er høyden over jordoverflaten og χ er solens senitvinkel. Tapet av frie elektroner bestemmes av N_e som er konsentrasjonen av frie elektroner, N_+ som er den positive ionetettheten og α_{eff} som er en konstant bestemt av hvilke typer ioner som er tilstede.

Elektrontettheten er avhengig av solens ultrafiolette stråling og vil variere med tid på døgnet, tid på året og variasjoner i solens 11 årige solflekkysyklus. Ioniseringslagene er klassifisert som D, E, F1 og F2. På grunn av solens intensitet vil lagenes plassering være forskjellig for natt og dag. På dagtid er lagene delt opp i D, E, F1 og F2. Om natten danner F1- og F2-lagene ett F-lag, mens D- og E-lagene danner ett E-lag, se figur 2.2.

Lagenes plassering i ionosfæren er:

D-lag	60-90 km
E-lag	90-150 km
F1-lag	150-210 km
F2-lag	200-1000km, hvor maksimal tetthet vil være i området 250 til 500 km.



Figur 2.2 På grunn av variasjoner i elektrontettheten er ionosfæren delt opp i flere elektrontetthetslag. I tillegg til lagene beskrevet her finnes det også lokale tetthetslag som er gitt benevnelsen spordisk E-lag (1).

D-laget er det laveste laget som dannes på grunn av sol ionisering og ligger i området 60 til 90 km. Ioniseringen begynner om morgenen, er på sitt maksimale punkt midt på dagen og avtar mot kvelden. Om morgenen og kvelden når solens vinkel over horisonten er minst er også ioniseringen svakest. D-laget reflekterer ikke HF-radiobølger fordi ioniseringen er for svak. Radiobølgene vil likevel starte svingninger i de frie elektronene, som igjen kolliderer med mye tyngere ioner og nøytrale partikler. Denne prosessen fører til at radiobølgene absorberes.

E-laget, som ligger i området 90 til 150 km er godt nok ionisert for å bøye et radiosignal tilbake mot jordoverflaten. Under rolige forhold vil dette laget ha den største tettheten ved 120 km, men store variasjoner forekommer. Forstyrrelser kan også forårsake lokale tetthetsmaksima.

Sporadisk E (E_s) er tynne sterke lag som er observert i området 100 til 125 km og oppstår sporadisk. E_s er skyer med frie elektroner, og det er antageligvis ikke sterkt knyttet til solens ionisering (1). Dannelsen av dette laget skyldes antageligvis dynamiske prosesser som partikkelnedbør fra magnetosfæren, ionisering på grunn av meteoror og elektronoppbygginger i skjæringsområdet mellom jetstrømmer med forskjellig retning og hastighet.

F-laget er det viktigste og høyeste laget, og ligger i området 150 til 1000 km. Dette lagets struktur deles opp i F1 og F2 om dagen på sommeren på grunn av sol ionisasjon. Om natten vil F1-laget forsvinne. F-laget er det viktigste laget ved ionosfærisk refleksjon av radiosignaler og er samtidig det laget som inneholder den største delen av ioniseringen. De fleste

HF-radioforbindelser over lange avstander baserer seg på refleksjon av radiobølger i dette laget.

Ionosfærens refleksjonsegenskaper er avhengig av radiobølgens frekvens og innfallsvinkelen på det reflekterende mediet. For ionosfærelagene betyr dette at en radiobølge kan trenge gjennom ett lag, men kan bli reflektert i ett høyere liggende lag. For hvert lag er det definert en plasmafrekvens og en kritisk frekvens. Disse frekvensene danner grunnlaget for valg av frekvenser.

Plasmafrekvens er en resonansfrekvens for et vilkårlig punkt i det ionosfæriske plasma. Plasmafrekvensen for et punkt er gitt som:

$$f_p = 9\sqrt{N_e} \quad (2.2)$$

I denne ligningen er f_p punktets plasmafrekvens og N_e er elektrontettheten i det bestemte punktet i ionosfærelaget, se kontinuitetsligningen. For et typisk E-lag med en elektrontetthet på 10^{11} elektroner/m³ vil $f_p = 2.85$ MHz.

Kritisk frekvens er den maksimale plasmafrekvens for hvert ionosfærelag. Denne frekvensen er definert som den høyeste frekvens et radiosignal kan ha for at det skal reflekteres ved vertikalt innfall.

2.2 Radiobølgeutbredelse

Radiobølger som treffer forholdene beskrevet i kapittel 2.1 vil bli avbøyd. Hvis ionosfæren sees på som et medium med en horisontal lagdeling der hvert lag har litt forskjellig brytningsindeks, kan brytningen mellom hvert lag beskrives med Snell's brytningslov:

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (2.3)$$

Her er n_1 og n_2 brytningsindeksen for de to lagene. θ_1 er vinkelen mellom innfallende stråle og vertikalen, θ_2 er vinkelen mellom utgående stråle og vertikalen.

Radiobølger med vertikalt innfall som har en høyere frekvens enn den kritiske vil gå tvers gjennom ionosfærelaget. Hvis radiobølgene har et skrått innfall på ionosfærelaget, øker gjennomslagsfrekvensen med økende vinkel. For en radiobølge med en frekvens som er høyere enn den kritiske frekvens, trenger radiobølgen gjennom ionosfærelaget ved en kritisk vinkel. Dette er vist i figur 2.3.

Maximum Useable Frequency (MUF)

MUF beskriver den største frekvens som kan benyttes på en gitt banestrekning ved ionosfæriske refleksjon. MUF kan beregnes ut fra kritisk frekvens for F2-laget etter følgende lov:

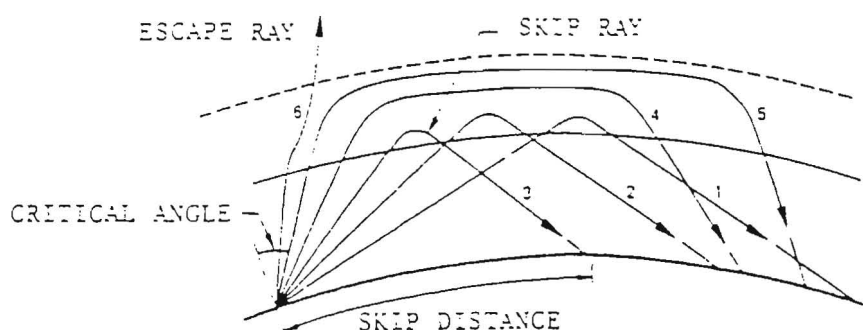
$$MUF = f_o = f_v \sec \theta \quad (2.4)$$

Her er f_v kritisk frekvens for ionosfærelaget. Frekvenser høyere enn MUF vil ikke reflekteres, men vil gå gjennom ionosfærelaget. Ionosfærelagets variable elektrontetthet som igjen varierer ionosfærelagets kritiske frekvens, fører til varierende MUF for en banestrekning og gitt tid på døgnet.

Lowest Useable Frequency (LUF)

LUF er den laveste frekvens hvor det kan oppnås kommunikasjon med en tilfredsstillende pålitelighet. Denne påliteligheten vil være avhengig av radiosystemets følsomhet for signal til støyforhold.

Ved å variere radiosignalets utgangsvinkel, med en frekvens som er lavere enn MUF, kan radiosignalet mottas på varierende avstander. Maksimal lengde for ett hopp på jordas overflate er omtrent 4000 km. Et slikt maksimalengdehopp er mulig ved refleksjon i F2-laget. I praktisk bruk er utgangsvinkelen begrenset av sendeantennen og jordplanet. Minimum hopplengde begrenses av kritisk frekvens og antennevinkel, se figur 2.3.



Figur 2.3 Dekningen til et HF-signal, samme frekvens for hver utgangsvinkel (1).

Området innenfor den minimale hopplengde kalles skip-sone. I denne sonen må radiokommunikasjon basere seg på jordbølgeforplantning. Likevel er det mulig å opprette radiosamband med svært korte hopp. Dette kalles NVIS (Near Vertical Incident Skywave). Ved NVIS radiokommunikasjon brukes radiofrekvenser som ligger nært opp til det reflekterende ionosfærelagets kritiske frekvens. Disse frekvensene reflekteres ved små antennevinkler og danner grunnlaget for svært korte hopp.

2.3 Signalspredninger

Flerbanespredning (tidsspredning) er den generelle beskrivelse for hvordan energien til et radiosignal kan overføres fra sender til mottager over flere forskjellige baner, se figur 2.1. På grunn av banenes forskjellige lengde vil energien mottas med en tidsdifferanse og faseforskjell. Flerbanespredning kan være et resultat av forskjellige veilengder innenfor ett ionosfærelag, refleksjon fra flere lag, flerhoppbaner eller en blanding av jord- og ionosfærebølger. I figur 2.1 er det vist forskjellige situasjoner som gir opphav til flerbanespredning. I

tilfellene 5 og 6 vil signalet overføres over to baner med forskjellig lengde. Resultatet av dette er at signalene mottas ved forskjellige tidsrom (bane 6 senere enn bane 5). I tilfellene 1 og 3 oppstår den samme situasjonen, men da er forskjellen svært stor. Avhengig av størrelsen på tidsspredningen og overføringshastighet kan det oppstå intersymbol interferens (ISI)

Frekvensskift oppstår ved at radiobølgens refleksjonspunkt i et ionosfærelag beveger seg mot eller fra jordoverflaten. Dette er gitt ved ligningen under.

$$\text{Frekvensskift} = f_m - f_s = f_s \sqrt{\frac{c-v}{c+v}} - f_s \quad (2.5)$$

I ligningen er f_m den mottatte radiobølgens frekvens, f_s er den sendte radiobølgens frekvens, c er lysets hastighet og v er hastigheten på det reflekterende lag. Ionosfærelagens dynamikk kan vises ved et tilfelle hvor vi antar et frekvensskift på 20 Hz, og en frekvens på 9.04 MHz. I dette tilfellet vil refleksjonspunktet bevege seg med en hastighet på over 660 m/s. Frekvensskift vil øke med økende radiofrekvens selv om det reflekterende lag beveger seg med en konstant hastighet.

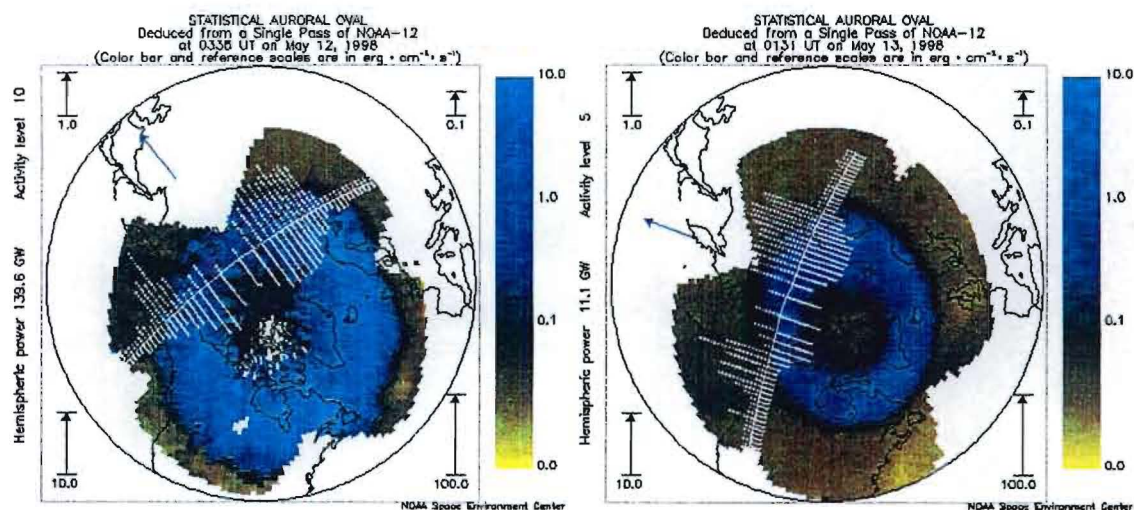
Frekvensspredning oppstår når radiobølgene følger flere baner, og hver bane introduserer hvert sitt frekvensskift. Også ved en bevegelse av refleksjonspunktet med en variabel hastighet, vil det dannes flere frekvensskift, som sammen danner frekvensspredning. Frekvensspredning er det fenomenet som introduserer det største problemet for HF-modemer.

I figur 2.1 er det vist situasjoner hvor det oppstår frekvensskift og –spredning. I tilfellet 1 beveger refleksjonspunktet seg mot jordoverflaten med en konstant hastighet og innfører frekvensskift. I tilfellet 2 endres refleksjonspunktets hastighet og dermed oppstår frekvensspredning. I tilfellene 1 og 2 introduseres forskjellig frekvensskift i E- og F-lag og resultatet blir frekvensspredning i mottager.

2.4 Partikkelnedbør og forstyrrelser

Ionosfæren er et svært variabelt medium. Et fenomen som virker forstyrrende på den normale ionosfære, er partikkelnedbør fra solen og magnetosfæren. Dette er elektroner, protoner og α -partikler som er energirike og kan trenge inn i atmosfæren og bidra til økt konsentrasjon av ioner og elektroner i ionosfærelagene. Inntrengning av ladde partikler fra solen skjer kun i de områdene rundt de geomagnetiske polene hvor retningen på jordens magnetfelt er nærmest vertikale. Når energirike partikler treffer jordens magnetosfære, kan disse lett følge magnetiske linjer, men vil ha vanskeligheter med å bryte på tvers av de samme linjene. Områdene som mottar partikkelnedbør kalles nordlysovaler. Ved partikkelnedbør vil svært energirike og mindre energirike partikler øke ionisasjon og absorpsjonen og danne irregulareteter i de reflekterende lag (2). Den uregelmessige elektrontettheten i ionosfærelagene vil variere høyden på refleksjonspunktet i de enkelte lagene og kan dermed endre radiobølgens utbredelse.

For å kunne tallfeste ionosfæriske forstyrrelser er det innført aktivitetsindekser. En av de mest brukte er den planetære K_p -indeksen som avledes av en lokalt målt K -indeks. Den lokale K -indeksen er kvasi-logaritmisk og beskriver den magnetiske aktiviteten i 3 timers intervaller relativt til en uforstyrret dag. En uforstyrret dag kan beskrives som en dag med liten geomagnetisk aktivitet. Denne indeksen beregnes for hvert enkelt geomagnetiske observatorie og skaleres fra 0, som er en uforstyrret periode, til 9, som er en kraftig forstyrret periode. K_p -indeksen er gitt som den midlede K -indeksen fra 13 geomagnetiske observatorier i området 46 grader nord og ned til 63 grader syd. Også denne er skalert fra 0 til 9. Den planetariske K_p -indeksen beskriver den magnetiske effekten av partikkelnedbør som er forårsaket av solen.



Figur 2.4 Disse to satellittmålingene over nordkalotten viser nordlys aktivitet ved en kraftig forstyrret (venstre) og uforstyrret (høyre) periode. Aktivitetsindeksen er i dette tilfellet ikke K_p , men en annen. Satellittens bane er vist som en kryssende linje og målt energi-nivå og -fordeling er vist som linjer som ligger normalt på satellittbanen (3).

I figur 2.4 er det vist to statistiske bilder av nordlysovalen. Til venstre er det vist en forstyrret periode hvor nordlysovalen dekker nesten hele Norge (midt på til høyre). K_p -indeksen vil i dette tilfellet være i området 7 til 9. I det høyre bildet er det vist en mindre forstyrret periode hvor nordlysovalen dekker området ned til midt-Norge. Her er K_p -indeksen omtrent 5.

Den økte og til dels varierende konsentrasjonen av elektroner under en geomagnetisk forstyrrelse gir opphav til endrede refleksjonsforhold, økt absorpsjon av radiobølgene og økt signalspredning.

I HF-radiokommunikasjon kan forstyrrelser i ionosfæren som er dannet av kraftig partikkelnedbør forårsake totalt sambandsbrudd, kjent som "blackouts".

2.5 Prediksjoner og ICEPAC

Som beskrevet tidligere, er ionosfæren en region i jordens atmosfære som kan være svært variabel med hensyn på lengde- og breddegrader, tid på døgn, sesong, variasjoner i solintensiteten og geomagnetisk aktivitet. Prediksjonsprogrammer for HF-bølgeutbredelse kombinerer empiriske ionosfæredata med bølgeutbredelsesmodeller og gir ut sannsynligheter for pålitelig HF-kommunikasjon (4).

Disse prediksjonene vil først og fremst være egnet til design av HF-systemer og langsiktig planlegging av frekvensbruk, fortrinnsvis på måneds- eller årsbasis. Det er også mulig for operatører å bruke prediksjonene til å velge riktig frekvens i forhold til ionosfærens varierende egenskaper i løpet av ett døgn. Programmene gir imidlertid ut kun statistiske gjennomsnitt av de faktiske forhold, slik at det ikke forventes at prediksjonene stemmer nøyaktig for en gitt dag. For at disse programmene skal bestemme viktige kanalparametere som pålitelighet, MUF, LUF, dekningsområder, refleksjonspunkter i de ionosfæriske lag og antall hopp, må det defineres inngangsparametere. Dette er blant annet antenntype og -retning, tid på året, geografisk plassering av sender og mottager, sendereffekt, forventet støy og krav til signal til støy forhold (SNR).

Ionospheric Communications Enhanced Profile Analysis and Circuit prediction program (ICEPAC) (5) er et HF prediksjonsprogram som er en videreutvikling av prediksjonsprogrammet Ionospheric Communications Analysis and Prediction Program (IONCAP) (22). Tidligere ionosfæremodeller tok ikke hensyn til ionosfærens dynamiske egenskaper på høyere breddegrader, men baserte prediksjonene på ionosfæriske egenskaper ved midlere breddegrader som ble ekstrapolert til høyere breddegrader. Ytelsen til disse modellene har vist seg å være dårlige ved prediksjoner av ionosfæren på høyere breddegrader.

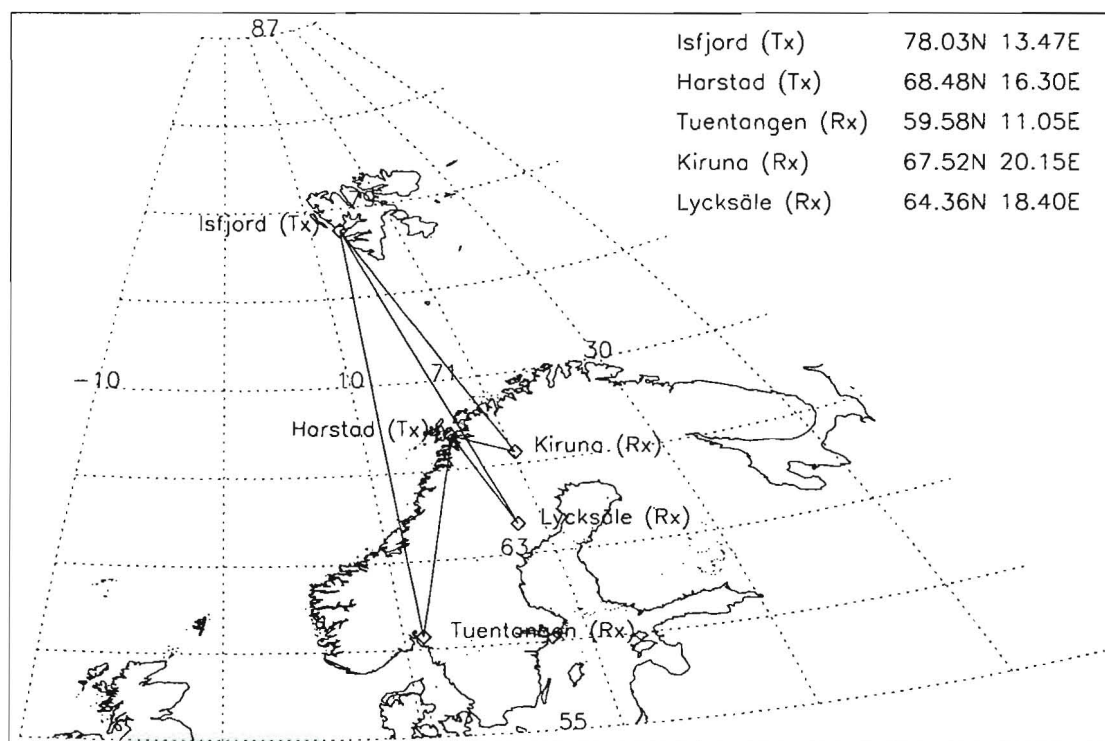
ICEPAC bruker en statistisk elektrontetthetsprofil som heter Ionospheric Conductivity and Electron Density (ICED) (6) som beskriver ionosfæren på høyere breddegrader for å utføre prediksjoner i denne regionen. Denne profilen modellerer blant annet nordlyssonen og området sør for nordlyssonen med svak ionisering. På grunn av dette ble ICEPAC valgt for å utføre prediksjoner til flerfrekvensanalysen senere i oppgaven.

MUF er en statistisk parameter i ICEPAC og er definert slik at i 50 % av tiden vil denne frekvensen gi refleksjon.

Reliability (pålitelighet) er også en statistisk parameter, og denne beskriver sannsynligheten for at SNR overstiger en påkrevd SNR som er gitt som en inngangsvariabel til prediksjonsprogrammet.

3 DAMSON PROSJEKTET

DAMSON (Doppler And Multipath SOunding Network) er et målesystem som er utviklet ved Defence Evaluation and Research Agency (DERA) i Storbritannia for å måle kanalparametere i HF-båndet på de nordlige breddegrader (7). Prosjektet er et samarbeid mellom DERA, CRC i Kanada, FOA i Sverige og FFI. Systemet opererer på 10 definerte frekvenser i området 2.8 til 21.9 MHz, og bruker en pulskompresjonsteknikk som gjør det mulig å måle kanalparametere selv under svært dårlige kanalforhold. Systemet kan blant annet måle TOF ("Time Of Flight") mellom sender og mottager, frekvens- og tidsspredning og signal til støy forhold. I dag er det plassert en sender (Tx) på Isfjord radio på Svalbard og en sender i Harstad. En mottager (Rx) er plassert på Tuentangen utenfor Lillestrøm og en mottager har alternert mellom Kiruna og Lycksåle i Sverige.



Figur 3.1 Kart som viser plasseringene til de forskjellige DAMSON enhetene.

3.1 Prosjektets formål

Ytelsen til HF-kommunikasjonsutstyr er avhengig av ionosfærens varierende egenskaper. Signal til støy forholdet vil avgjøre om kommunikasjon er mulig eller ikke, men det er også viktig i datakommunikasjon å håndtere tidsspredninger for å unngå ISI. Videre må mottageren håndtere frekvensspredninger ved bruk av hyppige filtertilpassinger. Det vil si at senderen må legge bestemte kjente bitsekvenser ("training sequences") inn blant de ukjente

data, slik at det adaptive mottagerfilteret kan optimaliseres i forhold til den eksisterende kanalsituasjonen.

Frem til utviklingen av DAMSON var det svært lite data tilgjengelig som kunne dokumentere fordeling av tids- og frekvensspredning i HF-båndet på nordlige breddegrader. Sendernes og mottagernes plassering er slik at DAMSON kan utføre målinger på baner som ligger i nordlysområdet, baner som ligger delvis inne i nordlysområdet og på baner som for det meste ligger utenfor nordlysområdet. Dette er:

Isfjord-Tuentangen er en 2 til 3 hopps nord-sør bane på 2016 km der det første refleksjonspunktet for det meste ligger i nordlysområdet.

Isfjord-Kiruna er en nord-sørøst bane på 1155 km og Isfjord-Lycksäle en nord-sørøst bane på 1500 km. Om natten vil mesteparten av disse banene være dekket av nordlysovalen.

Harstad-Tuentangen er en nord-sør bane på 981 km og ligger stort sett sør for nordlysområdet. Unntatt er perioder utsatt for kraftige geomagnetiske forstyrrelser.

Harstad-Kiruna er en vest-øst bane på 184 km og ligger enten helt utenfor eller innenfor nordlysovalen, avhengig av tid på døgnet og grad av geofysisk forstyrrelse. Dette er en bane med ekstreme og interessante signalforstyrrelser. På denne banen er det observert frekvensspredninger på over 80 Hz, som er større enn hva som kan måles av pulskompresjonsteknikken som brukes i DAMSON systemet (8).

Det viktigste formålet med dette prosjektet er å finne statistisk forekomst av spektral spredning, frekvensskift, flerbaneforsinkelse og signalstyrke til flere HF-baner på høyere og midlere breddegrader. Dette blir gjort ved å samle inn store mengder måledata. Målingene har foregått siden 1995 og vil fortsette i ennå noen år. Måledataene vil kunne brukes for å oppnå videre viktige målsetninger.

3.1.1 Vurdering av HF-modem bølgeformer

Data fra prosjektet vil bli brukt for å vurdere dagens og fremtidens bølgeformer til HF-modem. Disse dataene er spesielt viktige for å lage robuste bølgeformer som skal brukes på nordlige breddegrader (23). Denne hovedfagsoppgaven er et bidrag i dette arbeidet.

3.1.2 Oppdatering av prediksjonskoder

Forhåpentligvis kan modeller for spektral spredning (spesielt på høye breddegrader) utvikles på grunnlag av DAMSON dataene. Disse modellene kan da legges inn i prediksjonsprogrammer og gi prediksjonene en ny dimensjon.

3.1.3 HF-simulatorer

DAMSON dataene vil bli brukt til å utvikle en ny HF-simulator for å oppnå en mer nøyaktig testing av HF-modemer. Modemutviklere vil da med større sikkerhet beregne ytelsen til modemer som skal benyttes på nordlige breddegrader. Det er i dag under utvikling en simulator som bruker DAMSON resultater som grunnlag for en ionosfæremodell som brukes til ytelsessimulering av modemer (9).

3.2 Systembeskrivelse

DAMSON systemets oppbygning er beskrevet i (7). Styringsenheten i systemet er en IBM PC-AT kompatibel datamaskin. Den kontrollerer de grunnleggende systemfunksjoner som datalagring, målekonfigurasjon, GPS (Global Positioning Satellite)-kortet, DSP (Digital Signal Processing)-kortet og HF-radioen. DSP-kortet er den viktigste delen i systemet og kontrollerer sendeskjemaet for de enkelte bølgeformene. Sender- og mottagersystemene er synkronisert med en presisjon som er bedre enn $10 \mu\text{s}$ ved hjelp av GPS. Både sendere og mottagere har nøyaktige frekvensoscillatorer med en presisjon på 1 feil pr. 10^6 . Sendereffekten er på omtrent 250 W, og de to senderantennene er: En 90 m horisontal rombe på Isfjord Radio og en 60 m bredbånds dipol i Harstad. Mottagerantennene er en 80 m "sloping vee" på Tuentangen og 50 m dipol i Kiruna og Lycksäle.

Konfigurasjonen som brukes i systemet, måler kanalparametere med følgende grenseverdier:

- Tidsforsinkelse ($\leq 40 \text{ ms}$)
- Tidsspredning ($\leq 40 \text{ ms}$, oppløsning $400 \mu\text{s}$ i 3 kHz båndbredde)
- Frekvensskift og -spredning (-40 til 40 Hz , oppløsning 0.62 Hz)
- Signal til støy forhold (SNR ned til -30 dB)

Det er ikke mulig å måle alle kanalparametere med én type bølgeform. For å øke systemets fleksibilitet er det mulig å bruke flere bølgeformer. Disse er forskjellige med hensyn på varighet, båndbredde, repetisjonsfrekvens ("Pulse Repetition Frequency"), antallet pulser og så videre. Bølgeformene kan defineres i programvaren som styrer DAMSON systemet. Den viktigste bølgeformen som brukes i DAMSON systemet, og som kanalparameterene brukt i denne oppgaven er utledet fra, er Doppler-Delay (DD) bølgeformen.

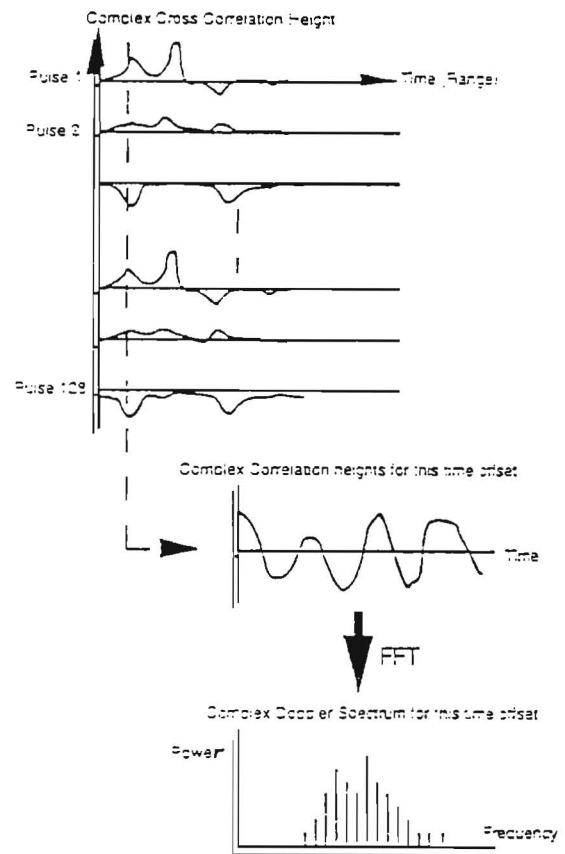
3.2.1 Doppler-Delay bølgeform

Denne bølgeformen gir en god frekvens- og tidsoppløsning, men på bekostning av maksimale verdier som kan måles for hver kanalparameter. Denne bølgeformen er en type direkte-sekvens spredt spektrum og prinsippet er:

En Barker-sevens (13 chips), sendes med en rate på 2400 bps som tilsvarer en båndbredde på omtrent 3 kHz. Denne pulssekvensen gjentas med en periode på 12.5 ms, og dette bestemmer maksimal flerbanespredning (12.5 ms) og det maksimale frekvensskift (± 40 Hz) som kan måles. Maksimale frekvensskift bestemmer også hvor stor frekvensspredning som kan måles (80 Hz). Pulssekvensen gjentas 128 ganger og den totale måletid er 1.6 s. Frekvensoppløsningen bestemmes av måletiden og er 0.62 Hz.

I mottageren blir hver enkelt mottatt sekvens punktprøvd og korrelert mot den sendte sekvens, som er kjent, og så blir den komplekse kanalimpulsresponsen bestemt for hver sekvens. Deretter punktprøves alle impulsresponsene for hver tidsforsinkelse τ , som vist i figur 3.2, og alle punktprøvene går gjennom en "Fast Fourier Transform" (FFT) for å beregne frekvensspekteret for hver enkelt punktprøvetidspunkt. Til slutt beregnes det en flerbaneprofil av det mottatte signalet ved å integrere frekvensspekteret for hvert enkelt punktprøvetidspunkt og plote denne profilen i forhold til de samme punktprøvetidspunktene.

Oppløsning og maksimalområde til de målte kanalparametere kan endres ved å forandre sekvens repetisjonsfrekvensen, og antallet sekvenser som sendes (7). Resultatet av sanntids prosesseringen i mottageren er et spektrogram vist midt på i figur 3.3, og som viser hvordan signalenergien er redistribuert i tid og frekvens som følge av kanalen. Dersom ingen tids- eller frekvensspredning har forekommet, er signalenergien fordelt over 0.6 ms og 0.62 Hz.

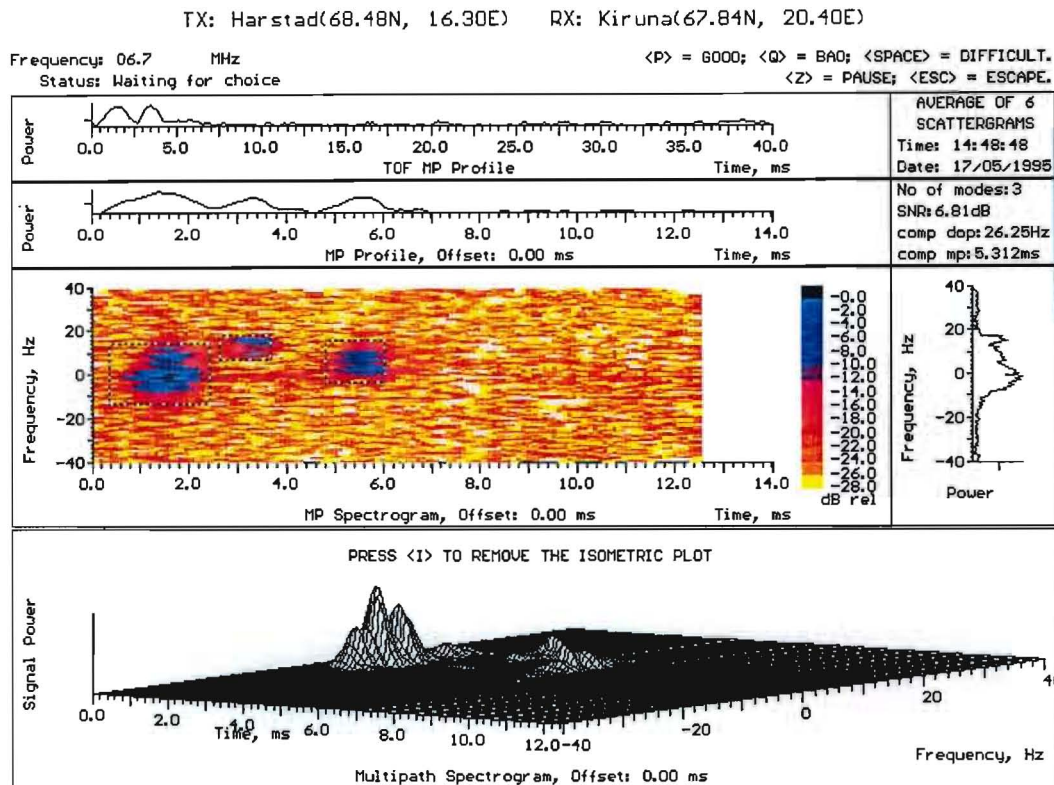


Figur 3.2 DAMSON bruker doppler integrasjon for å beregne frekvensspekteret for hvert tidsintervall.

3.2.2 Andre bølgeformer

I tillegg til DD-bølgeformen utføres det også en støymåling, en kontinuerlig bærebølgemåling (CW) som kan måle eventuelle store frekvensskift (± 150 Hz) uten å kunne oppløse signaler i tid, og en TOF måling, som er lik DD-bølgeformen, men med lavere pulsrepetisjonsfrekvens. Denne bestemmer store tidsforsinkelser (maksimalt 40 ms). Disse to siste målingene er til hjelp ved tolkning av spektrogrammet fra DD-målingen. Årsaken til dette er hvis frekvens- eller tidsspredninger er større enn det målbare området til DD-

bølgeformen så vil eventuelle signalmoder foldes. Det vil si at en mode som egentlig skal ha en tidsforsinkelse på 15 ms vil foldes og vises som en tidsforsinkelse på 2.5 ms. Den samme foldingeffekten kan oppstå ved store frekvensskift og -spredninger.



Figur 3.3 Playback analyseskjerm

3.3 DAMSON data-analyse

Kanalegenskapene til alle DAMSON frekvensene måles i løpet av en 10 minutters periode. For hver frekvens utføres det først en CW-måling, så en TOF måling, deretter 6 DD-målinger som midles, og til slutt en CW-måling. Når alle kanalmålinger er utført på de 10 DAMSON frekvensene og lagret, starter en ny målesekvens.

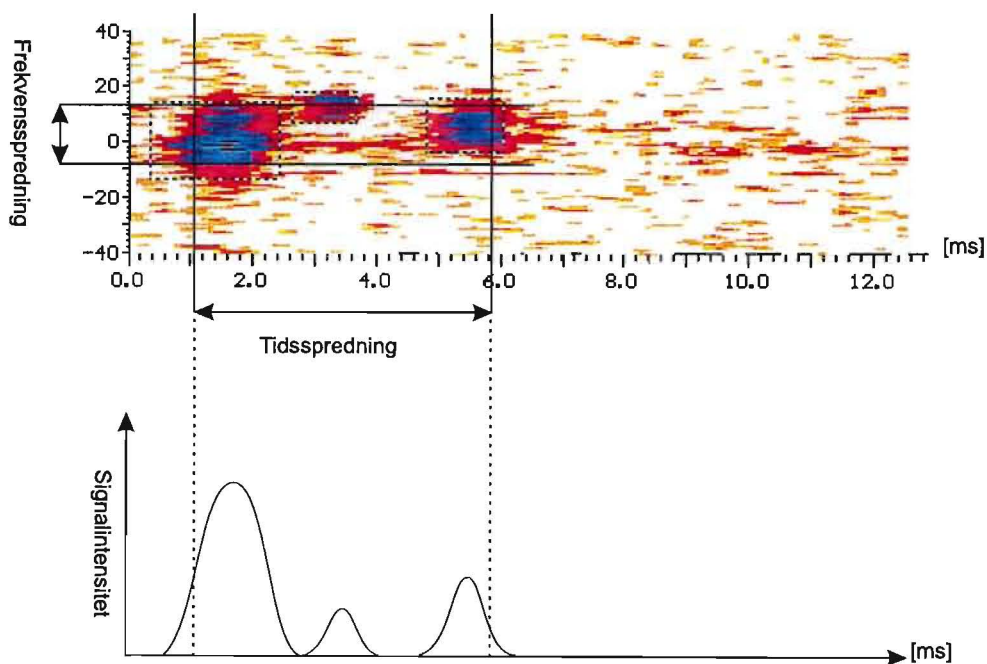
De lagrede DAMSON dataene bearbejdes videre med en programvare som heter PLAYBACK (10). Denne programvaren er utviklet ved DERA i England. PLAYBACK tolker datafilene fra hver 10 minutters periode og vil for hver frekvens beregne antallet bølgeutbredelsesbaner. Hver bane er representert som en signalmode i det beregnede spektrummet, se figur 3.3. I en ny datafil lagres blant annet signal til støy forhold, hver enkelt modes frekvensskift, tids- og frekvensspredninger, samt forskjellige statistiske mål.

3.4 Bearbejdede DAMSON data

DAMSON data som Playback beregner og som vi bruker i dette arbeidet er signal til støy forholdet, tidsspredning (80 % effektintervall) og frekvensspredning (80 % effektbåndbredde) for hver signalmode. Tids- og frekvensspredningen for hver enkelt signalmode bearbejdes videre til å gi kompositte verdier som representerer én tids- og én frekvensspredning for de mottatte signalmøder. Disse kompositte verdiene beregnes ut fra den antagelse at hver signalmode er Gauss fordelt, noe som er en mye benyttet antagelse i fysiske prosesser (11).

3.4.1 Signal til støy forhold

Denne verdien blir beregnet av PLAYBACK programvaren og beskriver det totale signal til støyforholdet for alle mottatte signalmøder. I denne beregningen brukes spektrogrammet bestemt av DD-bølgeformen. Støyverdien er definert som det området på spektrogrammet som har gjennomsnittlig lavest signalintensitet. Hver signalmode er merket med en boks, og intensiteten innenfor disse boksene summeres. Støyverdien blir trukket fra signalintensiteten og den resulterende verdien deles på støyverdien for å gi signal til støyforholdet.



Figur 3.4 Spektrogrammet øverst viser det mottatte signal i tid og frekvens sammen med den kompositte tids- og frekvensspredning. Nederste figur er en signalprofil i tidsplanet og viser signalstyrken til hver mottatt signalmode.

3.4.2 Kompositt frekvensspredning

For å kunne beregne den kompositte frekvensspredning (23), må alle signalmoder summeres til en profil som beskriver det samlede mottatte signal. I summasjonen vektet hver enkelt mode med den enkelte modes målte signalintensitet. Resultatet kalles en frekvensprofil og er beregnet på denne måte:

$$P(x) = \sum_i \frac{h_i}{(\sigma_i \sqrt{2\pi})} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2 \right] \quad (3.1)$$

Hvor x er frekvensen, h_i modens signaleffekt, μ_i er gjennomsnittsfrekvensen og σ_i er standardavviket. Alle disse verdiene blir beregnet av PLAYBACK. Frekvensspredningen defineres så som 80 % regionen av den beregnede frekvensprofilen. Dette er vist i figur 3.4.

3.4.3 Kompositt tidsspredning

I denne situasjonen blir ikke modene vektet og summert som det blir for frekvensspredningen. For hver mottatte signalmode er det beregnet tidspunktene som avgrensner 80 % av modens effekt. Dette er ett tidspunkt på stigende og ett på avtagende flanke. Den kompositte tidsspredningen er definert som differansen mellom 80 % tidspunktet på den første modes stigende flanke og 80 % tidspunktet på den siste modes avtagende flanke (23). Dette er vist i figur 3.4.

4 VIRKEMÅTE OG YTELSE TIL HF MODEMER

En bølgeform er en samlebetegnelse for modulasjonsform, rammestruktur, koding og interleaving. Vi har sett på to bølgeformer i denne oppgaven, dette er NATO STANAG 4415 (75 bps) basert på den amerikanske militærstandard MIL-STD-188-110A (12) som er en robust bølgeform, og NATO STANAG 4285 (2400 bps) (13) som er en mindre robust bølgeform. Disse bølgeformene er valgt fordi de tilfredsstiller to forskjellige krav til et kommunikasjonssystem. Det ene kravet er et systems overlevelsessevne. Det vil si hvor lenge det er mulig å overføre informasjon, selv under svært vanskelige ionosfæriske forhold. For å imøtekomme et slikt krav, brukes det en robust bølgeform. Selv om overføringsraten er svært lav, opprettholdes et minimum av samband.

Det andre kravet er høyest mulig dataoverføringsrate. HF-båndet har begrensede frekvensressurser, og det er vanskelig med gjenbruk av frekvenser siden kommunikasjon kan skje over lange avstander og dermed eksisterer en risiko for interferens fra andre radiosystemer. Frekvensbrukere tildeles 3 kHz frekvensluker og av denne grunn vil HF-modemer operere med en båndbredde som er mindre enn 3 kHz. STANAG 4285 representerer en bølgeform som kan operere med dataoverføringsrater fra 75 til 3600 bps på en slik båndbredde. Det eksisterer også modemer som kan operere med større bitrater, som 4800 bps (14).

I denne oppgaven bruker vi betegnelsene bølgeform og modem om hverandre. Det robuste modemmet representerer altså STANAG 4415 (75 bps) og det ikke-robuste modemmet STANAG 4285 (2400 bps).

Det kan virke kunstig å sammenligne to modemer med så forskjellige egenskaper (robusthet/høy datarate), men formålet er å konkret påvise deres egenskaper på aktuelle kommunikasjonsbaner.

4.1 STANAG 4415, 75 bps, Long interleaving

MIL-STD-188-110A, (75 bps) som er utviklet ved Harris Corporation er nylig blitt valgt som robust bølgeform i NATO og standardisert i STANAG 4415. MIL-STD-188-110A (videre beskrevet som 110A) er en standard som bruker flere bølgeformer for å operere med bithastigheter fra 75 til 2400 bps. I denne oppgaven ser vi kun på bitraten 75 bps. Denne ble valgt som STANAG på grunn av sin robusthet mot ekstreme frekvens- og tids-spredninger. 110A kan også operere på høyere bitrater, men da med en annen modulasjonsteknikk. Årsaken til at 110A ikke er valgt også for høyere bitrater er at STANAG 4285 oppnår en bedre tilgjengelighet og hurtigere synkronisering enn 110A for disse ratene (15).

4.1.1 Virkemåte

STANAG 4415, 75 bps er en bølgeform som bruker én bærebølge og overfører data serielt på denne med en symbolhastighet på 2400 baud. Bølgeformen bruker mye redundans for å oppnå god robusthet mot dårlige kanalforhold. Hvert enkelt informasjonsbit går først gjennom en $\frac{1}{2}$ rate $K=7$ konvolusjonskoder som gir en 2 bits utgangsverdi. Hvert utgangsbit legges i en interleaver struktur i en bestemt sekvens. Den robuste bølgeformen bruker lang interleaving, som er 4.8 s. En interleaver struktur kan ikke tømmes før den er fylt med bitnære verdier. Ved å bruke to interleaver strukturer kan den ene fylles opp, mens den andre tømmes. Ett og ett bit i hver rad i interleaver strukturen hentes systematisk, Grey-kodes og blir brukt til å velge en av fire mulige ortogonale Walsh-koder. Hver valgt Walsh-kode representert med 4 bits blir lagt inn 8 ganger i en rammestruktur på 32 bits. Innholdet i denne rammestrukturen kodes med en PN-sekvens og sendes i et 8-PSK format. Robustheten til dette modemmet oppnås på grunnlag av PN-sekvensen som sprer signalet tilfeldig over hele den tilgjengelige båndbredde, og rammestrukturen på 32 bit som representerer ett informasjonsbit.

4.2 STANAG 4285, 2400 bps, Long interleaving

STANAG 4285 er en bølgeform som ikke er spesielt robust mot hverken signal til støy forhold, frekvens- eller tidsspredninger sett i forhold til STANAG 4415. Bølgeformen ble

valgt som NATO STANAG på grunnlag av sin gode ytelse ved høyere hastigheter i forhold til andre bølgeformer (15).

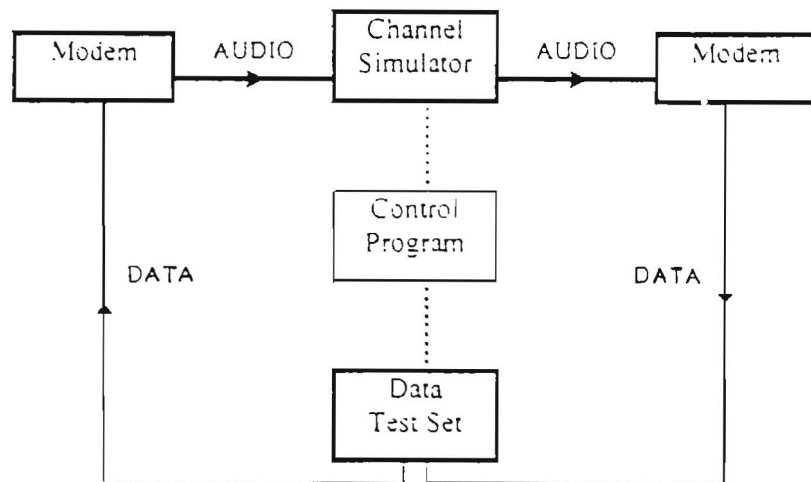
4.2.1 Virkemåte

STANAG 4285 bruker forskjellig modulasjonsteknikk for hastigheter over og under 1200 bps. For hastigheter fra 1200 bps opererer bølgeformen med en symbolhastighet på 2400 baud på én bærebølge. Ved å ta utgangspunkt i en 8-PSK struktur kan bølgeformen overføre data med en rate på henholdsvis 1200, 2400 og 3600 bps. De forskjellige ratene oppnås med transkoding. Det vil si at 1200 bps bruker 2 faser hvor hver fase representerer ett bit, 2400 bps bruker 4 faser representert med to bit og 3600 bps bruker alle 8 faser representert med 3 bit. Bølgeformen bruker en rammestruktur på 256 symboler. Denne rammestrukturen kan deles opp i 80 symboler for synkronisering, 48 referanse symboler og 128 data-symboler. Rammen kodes deretter med en PN-sekvens og moduleres med 8-PSK.

4.3 Ytelsessimulering

Bølgeformer blir i dag oftest vurdert ut fra simulerte ytelser. Alternativet til simulering er å bruke en testbane mellom to geografiske punkter. Dette gir presise resultater, men ulemper er at denne testtypen koster mye og at det må være en viss avstand mellom sender og mottager for å være sikker på at signalene følger en ionosfærebane og ikke en jordbølgebane. Et annet problem med en virkelig testbane er at man ikke er "sikret" at alle kanalforhold som man ønsker å teste modemmet under, opptrer i testperioden.

Simulerte ytelser som ligger til grunn for denne oppgaven blir utført ved hjelp av et laboratorie testoppsett beskrevet av (16), se figur 4.1.



Figur 4.1 Måleoppsett for simulering av bølgeformsytelser.

I laboratorieoppsettet brukes ett sende- og ett mottagermodem som har implementert den bølgeform som skal testes. Mellom disse modemene er det en audio- og en datalinje. På audiolinjen er det koblet inn en HF-kanalsimulator som er styrt av et kontrollprogram. Data fra sendemodemet overføres på audiolinjen gjennom kanalsimulatoren og til mottagermodemet. Referansedata overføres på datalinjen. Kontrollprogrammet sammenligner de detekterte data fra mottagermodem med referansedata, og kan ut fra dette beregne modemets ytelse. Kanalsimulatoren i dette oppsettet modellerer HF-kanalen med fire parametere i en bimodal¹ konfigurasjon som er basert på Wattersonmodellen (17). De fire parameterene er:

- *Signal til støyforhold (dB)*, som er den kombinerte effekten i de to signalmodene.
- *Tidsspredning (ms)*, som bestemmes av tidsseparasjonen mellom de to signalmodene.
- *Frekvensspredning (Hz)*, som er basert på spredningen til de to signalmodene.
- *Frekvensskift (Hz)*, som er basert på frekvensskiftet til de to signalmodene.

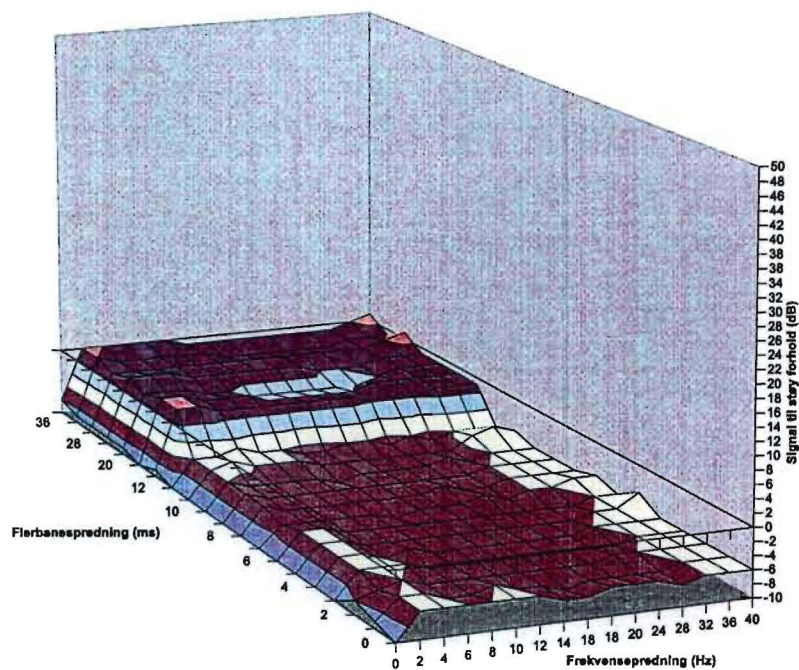
Problemet med en HF-kanalsimulator er at den må modellere ionosfærens komplekse struktur på en forenklet måte, og dermed vil den aldri kunne representere helt en virkelig kanal.

I hver simulering brukes en fast verdi for frekvensskift. Tids- og frekvensspredningene varieres i steg som er avhengig av den ønskede presisjon til ytelseskurven. For hvert par av frekvens- og tidsspredning varieres signal til støyforholdet inntil bitfeilraten ligger innenfor det definerte kravet til bitfeilrate. Hvis bitfeilraten er for lav, reduseres signal til støyforholdet og hvis bitfeilraten er for stor, økes signal til støyforholdet. Denne prosessen stoppes når bitfeilraten er innenfor intervallet $5 \cdot 10^{-3}$ til $0.2 \cdot 10^{-3}$.

Resultatene fra alle simuleringene utgjør en tredimensjonal ytelsesflate for hvert modem. Hvis tids- eller frekvensspredningene blir for store, slik at bitfeilraten ikke kan opprettholdes selv om signal til støy forholdet økes kraftig, går modemmet i metning. I disse simuleringene er denne metningsverdien 60 dB.

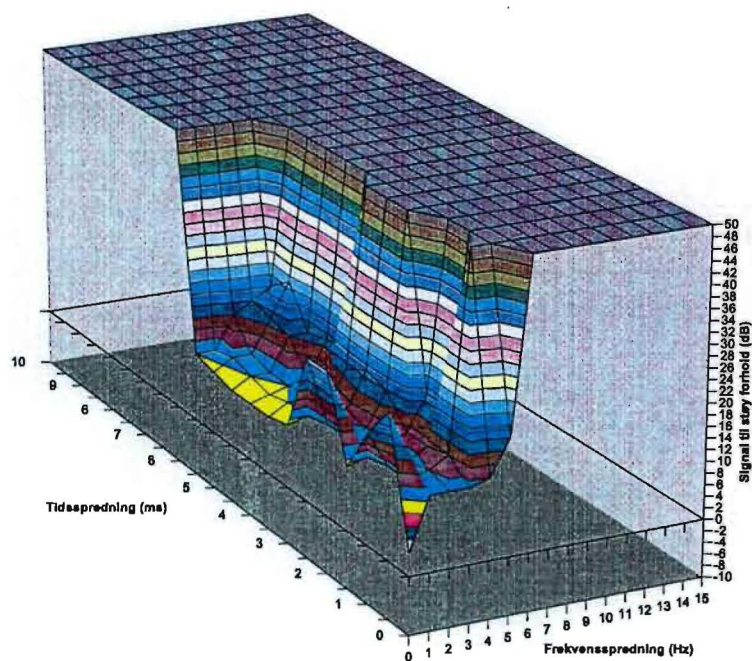
Ytelsessimuleringen til den robuste bølgeformen som er vist i figur 4.2 oppnår aldri metning. Dette skyldes modemdesignet som håndterer tids- og frekvensspredninger på over 40 ms og 40 Hz med en bitfeilrate som ligger i området $5 \cdot 10^{-3}$ til $0.2 \cdot 10^{-3}$.

¹ Signalet modelleres med to signalmoder som har lik signalstyrke.



Figur 4.2 Simulert ytelse til STANAG 4415, 75 bps, Long interleaving.

For den ikke-robuste bølgeformen viser den simulerede ytelser i figur 4.3 at dette modem når metning ved en tids- og frekvensspredning på henholdsvis 5 ms og 5 Hz.



Figur 4.3 Simulert ytelser til STANAG 4285, 2400 bps Long interleaving.

5 PROBLEMSTILLING

Frem til i dag har HF-radiokommunikasjonssystemer vært avhengig av operatører som til en hver tid må kjenne til og forstå HF-kanalens egenskaper. Denne forståelsen bruker operatøren for å velge frekvens og etablere samband. Kommende HF-systemer blir mer automatiserte og større kunnskap om varierende kanalforhold innebygges i teknologien. For eksempel kan utstyret selv finne frem til den beste frekvensen ved å lytte på et visst antall kanaler. I tillegg inneholder nye HF-systemer muligheter for å bruke forskjellige bølgeformer slik at det kan velges den til enhver tid best egnede bølgeform som kan opprettholde maksimal ytelse i forhold til de regjerende kanalforhold.

Målet med denne oppgaven er å sammenligne de to bølgeformenes simulerte ytelse med serier av kanalmålinger utført med DAMSON systemet. Følgende problemstillinger er forsøkt besvart:

- I. Hvor god tilgjengelighet sett i forhold til antall målepunkter kan det forventes av et robust modem (75 bps) og et høyhastighetsmodem (2400 bps) på DAMSON frekvensene på de aktuelle banene?
- II. Hvis en bølgeform ikke er detekterbar hos mottager, hvilken kanalparameter av enten signal til støyforhold, frekvensspredning eller flerbanespredning er da hovedårsaken til at denne bølgeformen feiler?
- III. Hvor god tilgjengelighet kan vi forvente i et flerfrekvenssystem, sett i forhold til et økende antall disponible frekvenser?
- IV. Vil det være mulig å antyde hvor mange frekvenser det bør brukes i et flerfrekvenssystem for å oppnå en god tilgjengelighet?

6 FREKVENNS- OG MODEMTILGJENGELIGHET

I den første delen av analysearbeidet var vi interessert i å se på tilgjengeligheten for to forskjellige modemer for utvalgte tidsperioder og banestrekninger. Dette er en tilgjengelighet som ikke er relatert til tid, men til det gitte antall målinger for de enkelte frekvenser. Det vil si at tilgjengeligheten uttrykker det prosentvise antall av målinger der modemene ville ha fungert gitt at de opererer på den aktuelle banestrekningen. Tidspunkter der ionosfæren ikke har gitt refleksjon er ikke tatt med i denne delen av analysen.

Modemtilgjengelighet for en frekvens kan beregnes ved å sammenligne målte, kompositte kanalparametere beskrevet i kapittel 3.4 med de simulerte flatene for et gitt modem som er beskrevet i kapittel 4. Hvert sett av kanalparametere definerer et punkt i et 3 dimensjonalt rom. En bølgeform defineres som tilgjengelig hvis det målte punktet ligger over den simulerte flate.

Til slutt var det interessant å prøve å bestemme hvilken av kanalparameterene som var årsak til at bølgeformen ikke var tilgjengelig når det målte punktet lå under den simulerte flaten. Dette ble forsøkt estimert ved å se på avstanden til den simulerte flate i hver av de tre dimensjonene og ut fra toleransekrav definere en eller flere kanalparametere som feilende.

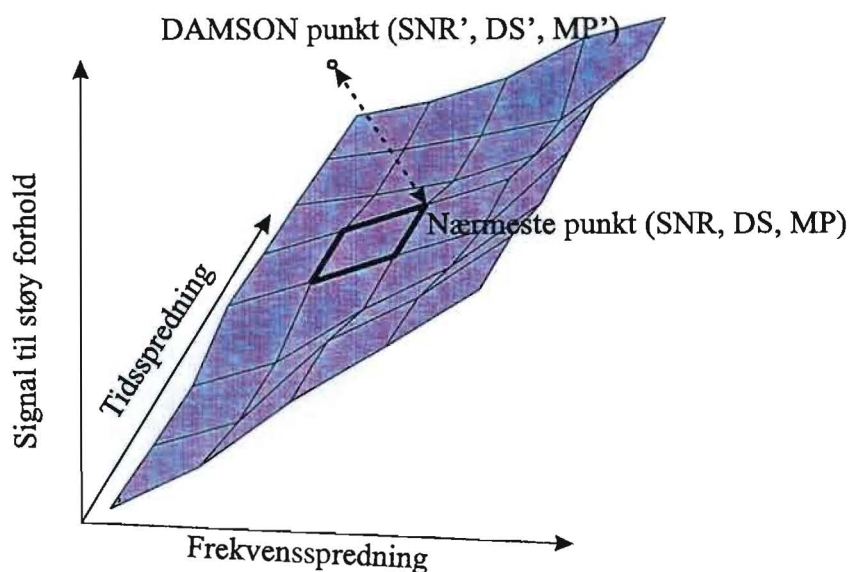
6.1 Hvordan beregne en bølgeforms tilgjengelighet

Når det skal vurderes om et DAMSON målepunkt representerer en HF-kanal som kan overføre data med en spesifisert bitfeilrate for et gitt modem, må dette punktet sammenlignes med bølgeformens simulerte ytelse. Den valgte fremgangsmåten er her å sammenligne det målte DAMSON-punktet med den nærmeste diskrete verdi i bølgeformens BER-flate.

Nærmeste simulerte punkt, benevnt som SNR, DS og MP er bestemt som det punktet som har kortest avstand til det målte punktet benevnt som SNR', DS' og MP' i det 3 dimensjonale rom. Dette rommet er representert av signal til støy forholdet (SNR), frekvens (DS)- og tidsspredningen (MP). Først finnes aktuelle nærmeste punkter ved å bruke de frekvens- og tidsspredninger som ligger nærmest de tilsvarende verdier for det målte punktet. Siden den simulerte BER-overflaten består av et rutenett av tids- og frekvensspredninger, vil det maksimalt være fire simulerte punkter som kan være aktuelle som det nærmeste punkt.

Nå er nærmeste punkt funnet (SNR, DS, MP), se figur 6.1, og dette punktet sammenlignes med det målte DAMSON punkt (SNR', DS', MP'). I denne sammenligningen brukes bare den målte og den simulerte verdien for signal til støy forholdet. Er $SNR' \geq SNR$, regnes det målte punktet som godkjent. Det vil si at modemmet kan overføre data med bitfeilrate bedre enn $5 \cdot 10^{-3}$ til $0.2 \cdot 10^{-3}$ for denne kanalsituasjonen. Det foretas deretter ingen videre prosessering av dette datapunktet. Hvis $SNR' < SNR$, kan ikke modemmet overføre data med den definerte bitfeilrate. Det målte punktet blir da ikke godkjent, som betyr at modemmet ikke kan overføre data med den definerte bitfeilrate.

Punkt som ligger utenfor den simulerte flate kan ikke testes med god sikkerhet og blir av denne grunn utelatt fra tilgjengelighetsanalyser. I praksis betyr dette at disse punktene ansees som ikke godkjente i tilgjengelighetsanalysen. Det forsøkes likevel å finne feilende parameter for punkt som ligger utenfor den simulerte flate.



Figur 6.1 Utsnitt av en simulert ytelse for en bølgeform med DAMSON målepunkt og nærmeste simulerte punkt.

6.2 Vurdering av feilende kanalparameter

I tillegg til tilgjengelighetsanalysen, forsøker vi også å bestemme hvilke(n) kanalparameter(e) (SNR, DS eller MP) som gjør at en bølgeform ikke greier å opprettholde en gitt bitfeilrate. Ved en slik feilparametervurdering bruker vi forskjellige metoder for STANAG 4285 (2400 bps) og STANAG 4415 (75 bps) på grunn av disse bølgeformenes egenskaper.

STANAG 4285 (2400 bps) er simulert med frekvens- og tidsspredninger opp til henholdsvis 15 Hz og 10 ms. Denne bølgeformen greier ikke å opprettholde en bitfeilrate i området 5 E-3 til 0.2 E-3 for enhver kombinasjon av frekvens- og tidsspredninger. Dette vises ved at signal til støyforholdet når en metningsverdi på 60 dB i det området hvor bølgeformen ikke greier å opprettholde den gitte bitfeilrate. Verdiene for DS og MP der SNR økes til 60 dB er henholdsvis 5.5 Hz og 5 ms. Den simulerte flate for STANAG 4285 (2400 bps) er vist i figur 4.3.

STANAG 4415 (75 bps) har et virkeområde som kan håndtere frekvens- og tidsspredninger helt ut til de grenseverdier som er definert i simuleringen. Disse grenseverdiene er satt til henholdsvis 40 Hz for frekvensspredning og 40 ms for tidsspredning. I de aller fleste tilfeller dekker disse verdiene eksisterende kanalsituasjoner, men det er observert ekstreme frekvens- og tidsspredninger på høyere breddegrader som er større enn de simulerte grenseverdier under geomagnetiske stormer (8). Den simulerte flate for STANAG 4415 (75 bps) er vist i figur 4.2.

6.2.1 STANAG 4285 (2400 bps)

Dersom målt datapunkt ikke godkjennes, skal vi prøve å bestemme hvilken kanalparameter som gjør at modemmet feiler. Det vil si at vi forsøker å bestemme i hvilken dimensjon datapunktet er lengst unna den simulerte flate. Metoden vi bruker er å prøve å bringe datapunktet over den simulerte flate ved å redusere verdiene i de to dimensjonene som beskriver frekvens- og tidsspredning. En eller flere kanalparametere (SNR, DS eller MP) kan være årsaken til at modemmet feiler.

Vi definerer toleranseverdier [2db, 3Hz, 1ms] som beskriver minimum avstand til flaten som må til for at en kanalparameter kan defineres som feilende. Dette er gjort for å unngå å bruke målinger som ligger minimalt under den simulerte BER-overflate i utarbeidelse av feilparameterstatistikk. Målinger som ligger nært inn til den simulerte flate vil ligge innenfor usikkerhetsmarginene både for DAMSON målingene (7) og for de simulerte verdiene (16) og blir ikke tatt med i en feilparameterstatistikk hvis ikke differansen er større enn de definerte toleranseverdiene.

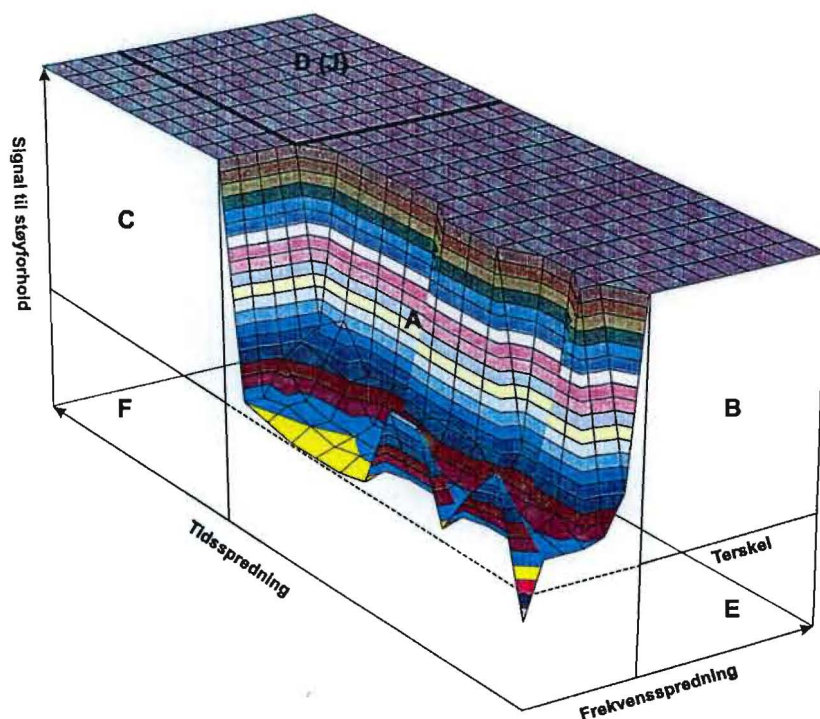
DAMSON-punktet kan ligge i ett av tre områder i forhold til den simulerte flate, se figur 6.2. Dette er:

Normal området (område A). I dette området er bølgeformen simulerbar, det vil si at det er funnet et signal til støyforhold for de valgte kombinasjoner av frekvens- og tidsspredning som tilfredsstiller bitfeilkravet på $5 \cdot 10^{-3}$ til $0.2 \cdot 10^{-3}$. Et DAMSON punkt som ligger under flaten i denne regionen kan ved feilparameteranalyse sammenlignes med ett av de simulerte punktene.

Metnings området (område B, C, og D). På grunn av store tids- og frekvensspredninger vil aldri en bitfeilrate på $5 \cdot 10^{-3}$ til $0.2 \cdot 10^{-3}$ oppnås uansett økning av signal til støyforholdet (16).

Subterskel området (område E, F og J). Når signal til støyforholdet i det målte DAMSON punktet er lavere enn en definert terskelverdi og samtidig befinner seg i metningsområdet, sier vi at den er i subterskelområdet. Terskelverdien er definert som det laveste signal til støyforhold på den simulerte flate og er estimert ved en visuell inspeksjon av flaten.

Feilparameteranalysen kan ikke i alle tilfeller finne feilende parameter. Dette skyldes tilfeller hvor feilverdier ligger innenfor de definerte toleranser for henholdsvis signal til støyforhold, tids- og frekvensspredning. Men det kan også være tilfeller hvor alle kanalparametere er årsak til at bølgeformen feiler. Det er flere mulige situasjoner hvor en eller flere parametere feiler.



Figur 6.2 Ved feilparameteresting må den simulerte ytelsen til STANAG 4285 (2400 bps) deles opp i forskjellige områder.

6.2.1.1 Feilende kanalparametere hvis det målte punktet ligger i normal området

Hvis det målte punktet ligger i området A i figur 6.2, vurderes først SNR-parameteren. Hvis målt SNR ligger mer enn 2 dB under SNR i det nærmeste simulerte punktet, ansees SNR som en feilende parameter. Ligger SNR innenfor toleransekravet på 2 dB, teller vi ikke opp SNR som en feilende parameter for dette målepunktet.

Neste steg i vurderingen av feilende parameter er å utføre en reduksjon av frekvensspredningen til målepunktet og dermed redusere kravet til SNR inntil målt SNR kommer over den simulerte flate, eller inntil frekvensspredningen er redusert til 0 Hz. Hvis SNR kommer over flaten ved en reduksjon av frekvensspredningen, og den nødvendige reduksjonen overstiger 3 Hz ansees frekvensspredningen som feilende. Den samme reduksjonen gjøres av tidsspredningen, og her ansees tidsspredningen som feilende hvis reduksjonen overstiger 1 ms.

Hvis både tids- og frekvensspredningen reduseres til henholdsvis 0 Hz og 0 ms uten at målt SNR kommer over den simulerte flate utføres en samtidig reduksjon av de to signalspredningene. Spredningene for det målte punktet reduseres med henholdsvis 3 Hz og 1 ms, og et nytt nærmeste punkt lokaliseres. Dette gjentas inntil målt SNR blir liggende over den simulerte flate, eller til reduksjonene fører til at enten frekvens- eller tidsspredningen

reduseres til henholdsvis 0 Hz eller 0 ms. Hvis den første reduksjonen av spredningene bringer målt SNR over den simulerte flate, telles ikke frekvens- og tidsspredningen som feilende på grunn av de tidligere nevnte simulering- og måletoleranser. Men hvis gjentatte reduksjoner fører til at målt SNR kommer over den simulerte flate, ansees både frekvens- og tidsspredningen som feilende. I situasjoner hvor målt SNR aldri kommer over den simulerte flate, kan ikke noen av spredningene ansees som feilende.

6.2.1.2 Feilende kanalparametere hvis det målte punktet ligger i metningsområdet og over terskel

I de tilfellene hvor det målte punktet ligger i områdene B, C eller D blir ikke SNR vurdert som en feilende kanalparameter. Som tidligere beskrevet vil det i følge (16) ikke være mulig med økende SNR å opprettholde den definerte bitfeilrate når frekvens- og tidsspredningene er så store. Derfor kan ikke målt SNR sammenlignes med flatens metningsverdi siden dette er en verdi som blir definert på forhånd i laboratorieoppsettet for bølgeformssimuleringer.

Det vurderes om frekvens- eller tidsspredningene kan være årsak til at bølgeformen ikke kan mottas tilfredsstillende under de gitte kanalforhold. Her er det flere situasjoner som kan oppstå. Dette er:

B området. For B området reduseres frekvensspredningen til det målte punktet inntil SNR for målepunktet kommer over den simulerte flate. Hvis denne reduksjonen er over 3 Hz, tolkes frekvensspredningen som en feilende kanalparameter.

C området. Samme prosedyre som i tilfellet over, men her reduseres kravet til tidsspredningen. Hvis reduksjonen til tidsspredningen er over 1 ms, tolkes tidsspredningen som en feilende parameter.

D området. I dette tilfellet vil ingen av de to prosedyrene beskrevet over bringe målepunktet over den simulerte flate. For å kunne utføre en vurdering av feilende parameter må det foretas en samtidig reduksjon av frekvens- og tidsspredningen. Spredningene reduseres med henholdsvis 3 Hz og 1 ms, og så finnes et nytt nærmeste simulert punkt til de reduserte spredningsverdier. Dette gjentas helt til målt SNR kommer over den simulerte flate, eller til en av spredningsverdiene er redusert til 0 Hz eller 0 ms. Hvis målt SNR kommer over flaten og spredningene er redusert med mer enn 3 Hz og 1 ms, tolkes frekvens- og tidsspredningen som feilende. I de tilfeller hvor frekvens- eller tidsspredningen er redusert til henholdsvis 0 Hz eller 0 ms uten at målt SNR kommer over den simulerte flate, blir ikke noen av spredningene tolket som feilende.

6.2.1.3 Feilende kanalparameter hvis det målte punktet ligger i metningsområdet og under terskel

I denne situasjonen ligger målt SNR under den simulerte flate. Selv om spredningsverdiene reduseres så vil ikke målt SNR komme over den simulerte flate. I disse tilfellene er det naturlig å vurdere om målt SNR likevel er en årsak til at modemmet feiler sammen med en eller begge to av de andre kanalparameterene. Målt SNR sammenlignes med terskelverdien og hvis målt SNR ligger mer enn 2 dB lavere, tolkes SNR som en feilende parameter.

Til slutt skal det vurderes om frekvens- og tidsspredningen kan tolkes som feilende.

E området. I de tilfellene hvor det målte punktet ligger i E området, reduseres frekvensspredningen til det målte punktet inntil simulert SNR ikke lenger ligger i metning. Hvis denne reduksjonen er mer enn 3 Hz, tolkes frekvensspredningen som en feilende parameter. Er den mindre enn 3 Hz, tolkes den som ikke feilende.

F området. Samme som for E området, men her reduseres tidsspredningen i stedet for frekvensspredningen. Her er toleransen 1 ms når tidsspredningen skal tolkes som feilende eller ikke feilende.

J området. Som for D området reduseres frekvens- og tidsspredningen med henholdsvis 3 Hz og 1 ms samtidig, men dette blir utført bare en gang. Hvis denne reduksjonen fører til at simulert SNR fortsatt ligger i metningsområdet, tolkes frekvens- og tidsspredningen som feilende kanalparametere.

6.2.2 STANAG 4415 (75 bps)

Feilparameteranalysen som er utført for STANAG 4285 (2400 bps) forutsetter at den simulerte BER-overflate går i metning. Selv om simuleringene av STANAG 4415 (75 bps) er utvidet opp til 40 Hz og 40 ms, nås ikke et metningsområde for denne bølgeformen. Feilparameteranalysen som er tidligere beskrevet kunne blitt benyttet for denne bølgeformen hvis simuleringene hadde blitt utført med økende frekvens- og tidsspredninger inntil bølgeformen gikk i metning. Siden simuleringene er stoppet før metningsområdet, kan det brukes en enklere fremgangsmåte for å forsøke å definere modemets robusthet overfor de tre ulike kanalparameterene. Vi har valgt å se på hvor de målepunktene som befinner seg under flaten, fordeler seg i forhold til flaten.

6.2.2.1 Fordeling av målte verdier i forhold til den simulerte ytelse

Vi deler opp flaten i tre områder, se figur 6.3. Denne oppdelingen skjer ved en visuell inspeksjon av bølgeformen, og gjelder bare for denne bølgeformen. De tre områdene er:

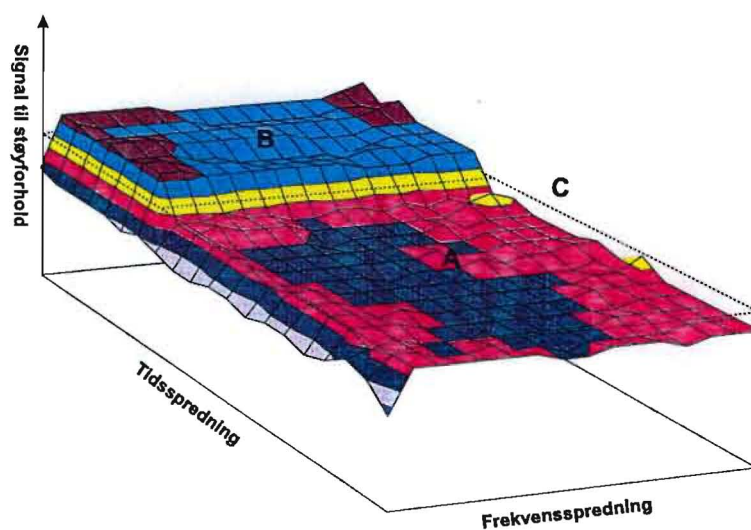
A området er avgrenset av en frekvensspredning på inntil 40 Hz og en tidsspredning på inntil 14 ms. Dette er det området i den simulerte flaten hvor den robuste bølgeformen kan operere med signal til støyforhold ned mot -7 dB.

B området er avgrenset av en frekvensspredning på inntil 40 Hz og tidsspredninger i området 14 til 40 ms. Følsomheten for signal til støyforhold blir her noe redusert i forhold til A området og kan håndtere verdier ned mot -1 dB.

C området har vi definert som området utenfor de simulerte verdier, som i dette tilfellet krever en frekvensspredning på over 40 Hz og en tidsspredning på over 40 ms.

I vår vurdering av feilende kanalparameter for STANAG 4415 (75 bps) ser vi kun på fordelingen til de målepunktene som ikke blir godkjent ved tilgjengelighetsanalysen, og angir prosentvis fordeling i områdene A, B og C.

Siden grensene for modemets toleranse for tids- og frekvensspredning ikke er nådd under simuleringene, vil ikke disse to kanalparameterene være årsak til at modemmet feiler, kun SNR.



Figur 6.3 Områdeinndeling av STANAG 4415 (75 bps) ved statistisk fordeling av kanalparameterene.

7 RESULTATER FRA FREKVENSTILGJENGELIGHET

I dette kapittelet er det beregnet tilgjengelighet for de enkelte DAMSON frekvenser sett i forhold til det faktiske antall målinger som er registrert på hver frekvens. Dette er altså ikke en tilgjengelighet sett i forhold til tid.

Vi har valgt å tolke data i fra to perioder i et døgn. Dette er fire timer sentrert rundt lokal middag 09-13 UT, hvor ionosfæren er delt opp i tre til fire lag og hvor absorpsjonen er størst. Den andre perioden er seks timer sentrert rundt geomagnetisk midnatt, 19-01 UT, hvor ionosfæren er delt opp i to til tre lag.

Vi viser resultatene fra hver bane i egne underkapitler. De tre første figurene i resultatene for hver bane viser gjennomsnitt og standardavviket for hver målt kanalparameter. Dag- og nattperioden er vist i samme figur. I tillegg er det over hver standardavviksøyle gitt antallet datapunkter som ligger til grunn for de statistiske beregningene.

De fire neste figurene viser modemtilgjengeligheten til STANAG 4285 (2400 bps) og STANAG 4415 (75 bps) på dag- og nattertid for hver DAMSON frekvens. Som for kanalmålingene er antallet datapunkter som ligger til grunn for den beregnede tilgjengelighet gitt over hver søyle.

Til slutt er det to figurer som viser fordelingen av de kanalparametere som er årsak til at STANAG 4285 (2400 bps) feiler for dag- og nattperioden. Prosenttallet som hver søyle representerer beregnes ut fra antallet datapunkter som ikke godkjennes ved tilgjengelighetsvurderingen. Summen av prosenttallene for de tre feilende parametere for hver frekvens kan overstige 100 %. Dette er mulig siden flere parametere kan feile samtidig. Over hver gruppe av feilende parametere for hver frekvens er det gitt antallet datapunkter som ligger til grunn for feilanalysen. I tolkningen av disse figurene er det viktig å vurdere antallet datapunkter for å være sikker på gyldigheten til hver enkelt beregning.

En svakhet med dataseriene som ligger til grunn for disse tilgjengelighetsanalysene, er at de mangler data fra tilfeller med ekstreme spredninger, eller hvor signalmodene er blandet med interferens. I disse tilfellene kan ikke PLAYBACK programvaren bruke disse dataene uten at operatør merker disse i en egen rutine. Disse dataene er ennå ikke tilgjengelige.

7.1 Harstad - Kiruna

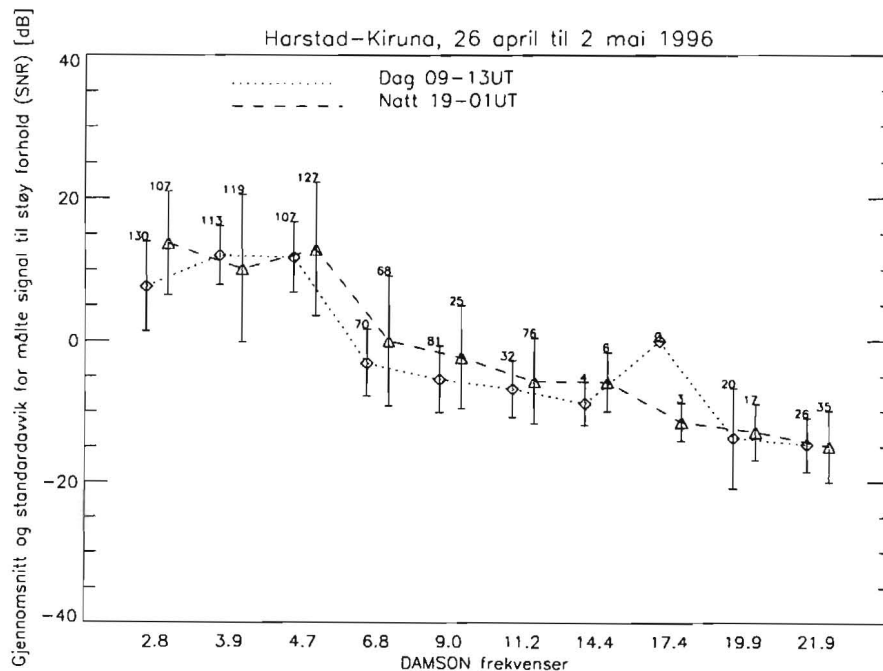
Denne vest-øst banen ligger sør for nordlysområdet på dagtid ved uforstyrrede perioder, men kan ligge i randsonen om natten under de samme forhold. I forstyrrede perioder ligger denne banen innenfor nordlysområdet. På grunn av banens retning og beliggenhet, er det mulig å observere kraftige signalforstyrrelser under geofysisk forstyrrede perioder (8).

Det er utført analyser fra den kontinuerlige perioden 26 april til 2 mai 1996. I denne 7 dagers perioden er det mulig å foreta 1008 målinger på hver frekvens. Det største antall målinger registrert er 583. På denne banen på 184 km er det prediktert en MUF på omtrent 5 MHz på dagtid, og en MUF i området 3 til 5 MHz om natten.

Som beskrevet tidligere kan denne banen oppleve kraftige ionosfæriske forstyrrelser på grunn av partikkelnedbør. I den valgte analyseperioden ligger K_p -indeksen i området 1 til 3, som tilsvarer en rolig periode. Nordlysområdet vil da for det meste ligge nord for denne banen. Dette har ført til at måleserien inneholder få tilfeller med store signalspredninger. Likevel eksisterer det målte frekvensspredninger på over 50 Hz i denne perioden.

7.1.1 Oversikt over målte kanalparametere i perioden

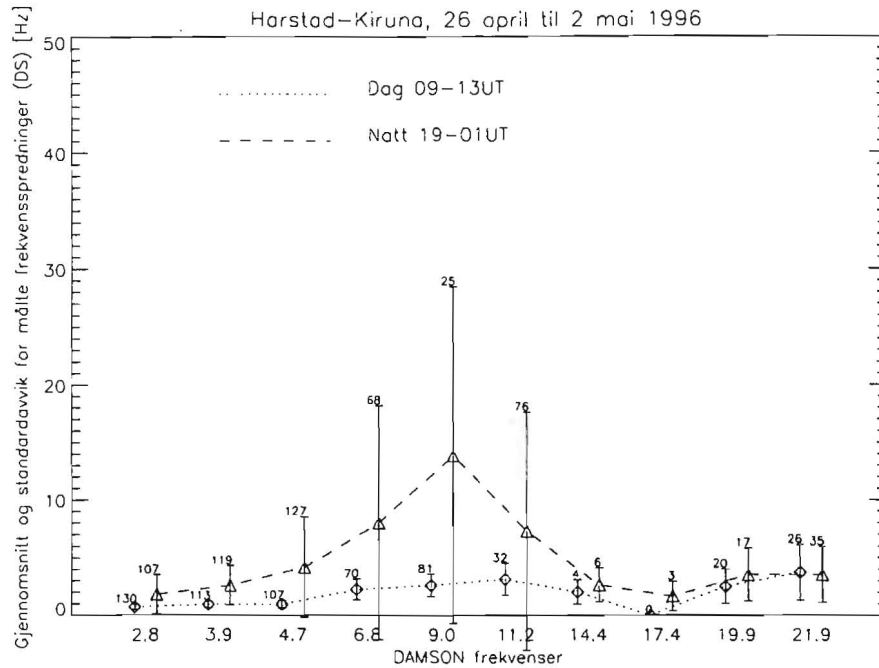
Figur 7.1, 7.2 og 7.3 viser fordelingene av målingene med hensyn på SNR, DS og MP i perioden. Både på dag- og natterstid er det målt gode signal til støy forhold på de tre laveste frekvensene, se figur 7.1. Ved små innfallsvinkler er det de laveste frekvensene som reflekteres, mens høyere frekvenser går gjennom det reflekterende lag. De tre laveste frekvensene ligger i dette tilfellet under prediktert MUF. Antall målinger og SNR avtar for frekvensene over MUF, men ikke i så stor grad som forventet.



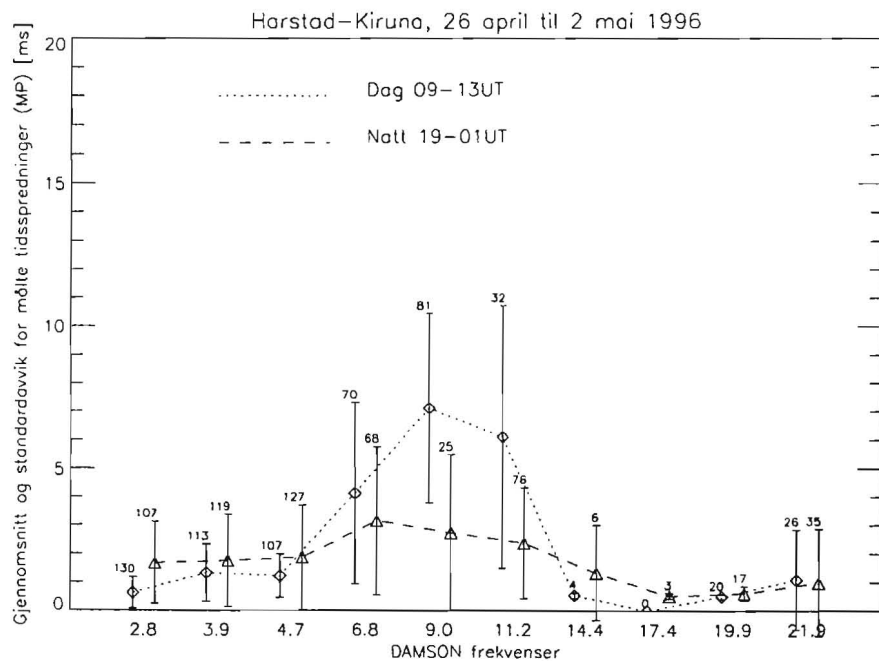
Figur 7.1 Gjennomsnitt og standardavvik for SNR på dag og natt. Antallet punkter som ligger til grunn for beregningene er gitt over hver standardavviksøyle.

Frekvensspredningen (figur 7.2) er liten for alle frekvenser på grunn av at dette er en uforstyrret periode. Unntaket er frekvensområdet 7 til 11 MHz om natten, hvor det er målt

gjennomsnittlige frekvensspredninger fra 5 til 15 Hz. Dette kan skyldes refleksjoner over MUF fra ladnings-irregulariteter inne i nordlysovalen.



Figur 7.2 Gjennomsnitt og standardavvik for frekvensspredning på dag og om natt. Antallet punkter som ligger til grunn for beregningene er gitt over hver standardavviksøyle.



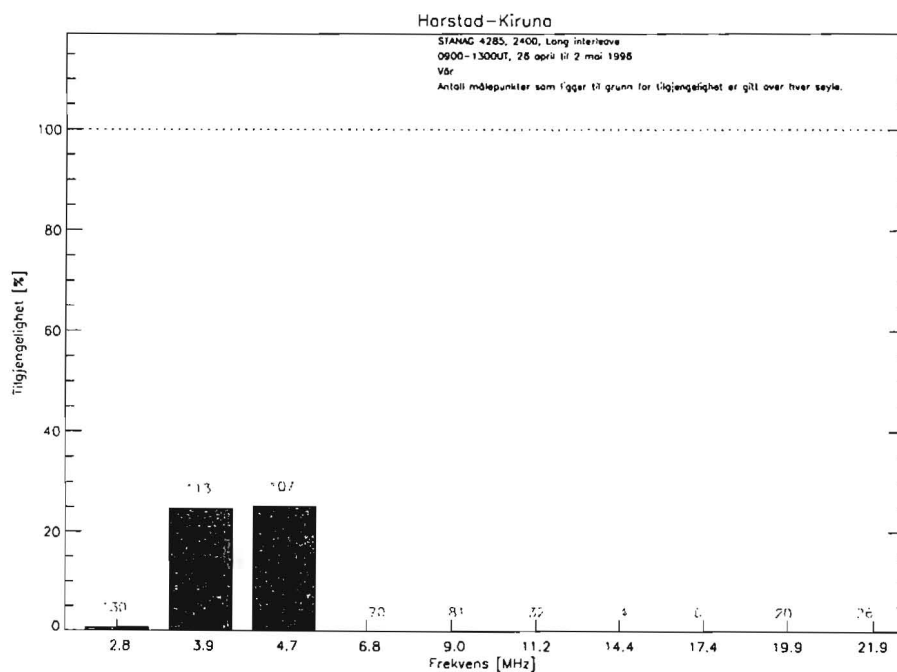
Figur 7.3 Gjennomsnitt og standardavvik for tidsspredning på dag og om natt. Antallet punkter som ligger til grunn for beregningene er gitt over hver standardavviksøyle.

Tidsspredningen (figur 7.3) er også liten i denne perioden, med unntak av frekvensområdet 7 til 11 MHz på dagtid. Her er det målt gjennomsnittlig tidsspredning fra 4 til 7 ms. En mulig årsak til det kan være at også E-laget eksisterer på dagtid og gir opphav til flere forskjellige signalveier.

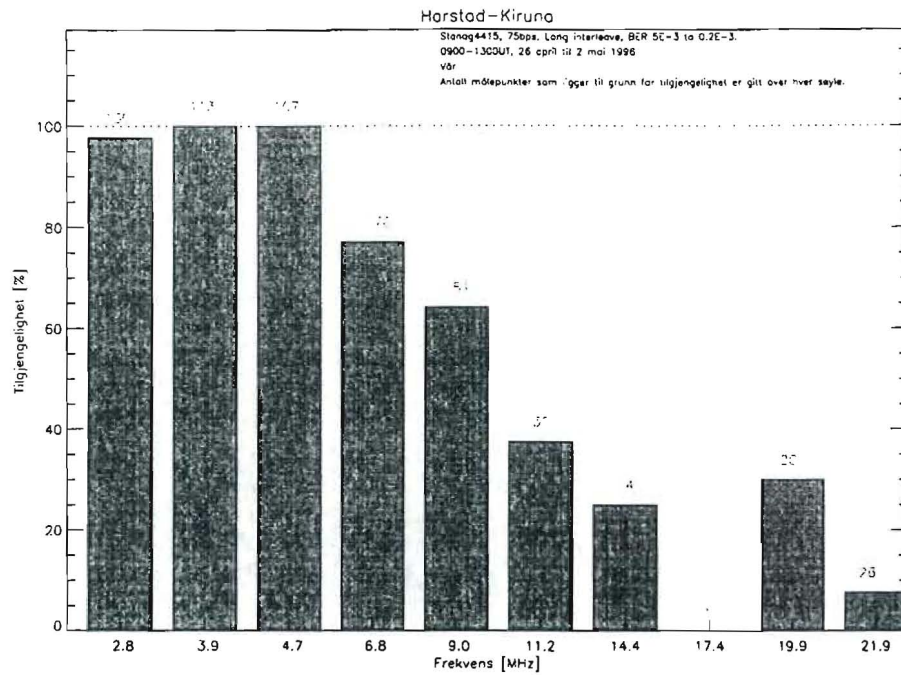
7.1.2 Modemtilgjengelighet for perioden

Figur 7.4 til 7.7 viser modemtilgjengelighet på dagen og om natten for den ikke-robuste og robuste bølgeformen. Denne analysen viser klart at den robuste bølgeformen oppnår en svært god tilgjengelighet (over 90 % på enkelte frekvenser) i forhold til den ikke-robuste bølgeformen både på dag- og nattertid. Det presiseres at dette er en tilgjengelighet som er beregnet i forhold til antallet registrerte målinger og ikke det totale antall mulige målinger.

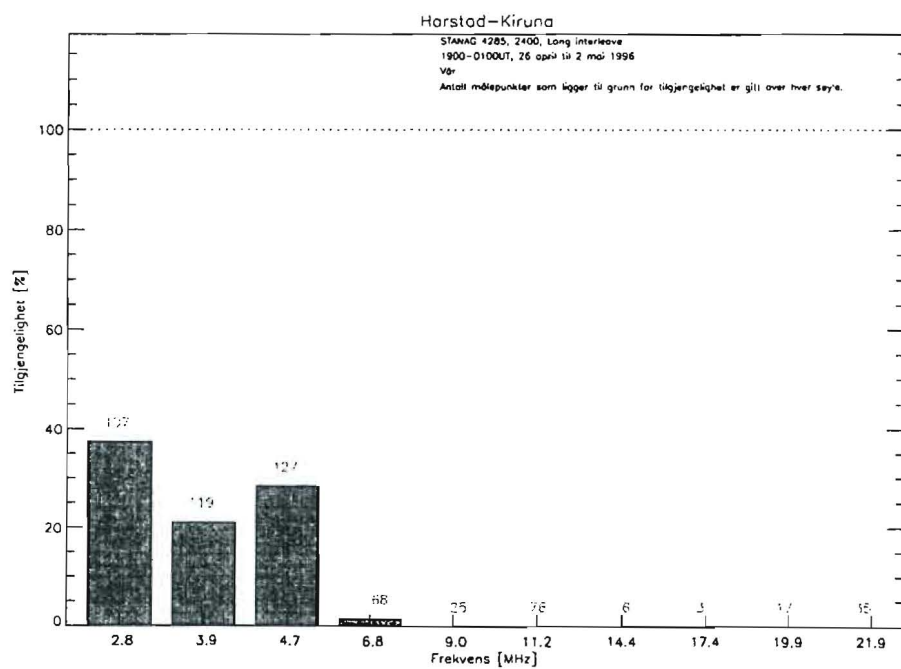
Den tydeligste forskjellen mellom resultatene fra natt og dag er at det ikke oppnås tilgjengelighet for den laveste frekvensen på dagtid med den ikke-robuste bølgeformen, se figur 7.4 og figur 7.6. Større absorpsjon om dagen på grunn av solstråling er årsaken til dette.



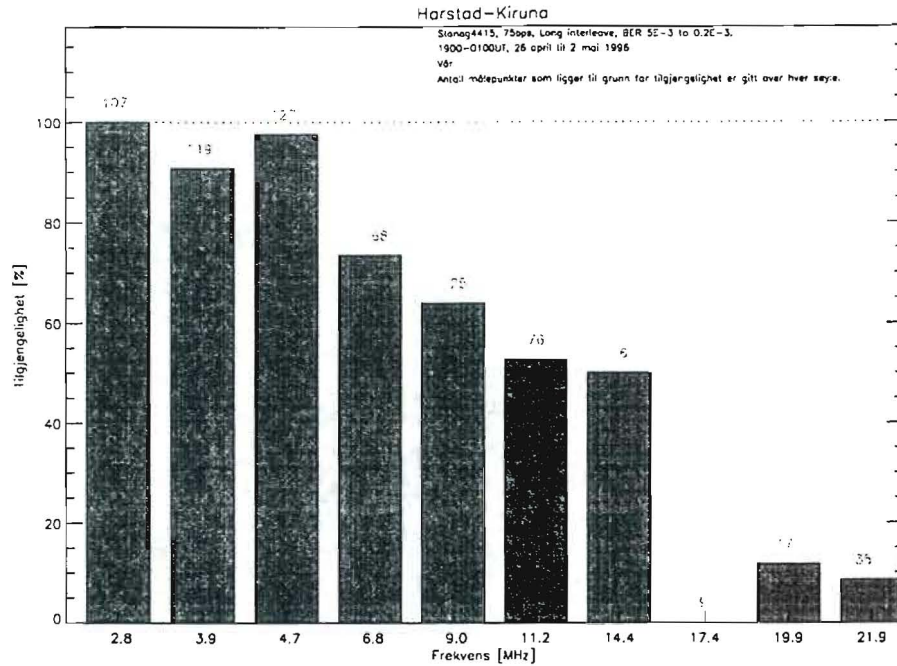
Figur 7.4 Modemtilgjengelighet for STANAG 4285 (2400 bps) for hver enkelt DAMSON frekvens på dagtid i perioden 26 april til 2 mai 1996.



Figur 7.5 Modemtilgjengelighet for STANAG 4415 (75 bps) for hver enkelt DAMSON frekvens på dagtid i perioden 26 april til 2 mai 1996.



Figur 7.6 Modemtilgjengelighet for STANAG 4285 (2400 bps) for hver enkelt DAMSON frekvens om natten i perioden 26 april til 2 mai 1996.



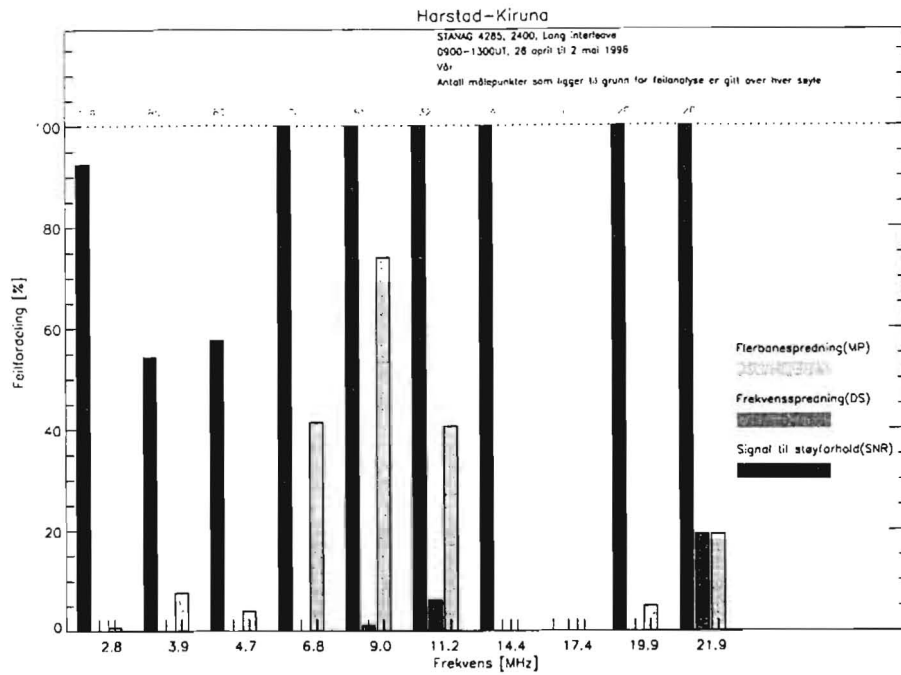
Figur 7.7 Modemtilgjengelighet for STANAG 4415 (75 bps) for hver enkelt DAMSON frekvens om natten i perioden 26 april til 2 mai 1996.

En annen observasjon er at den robuste bølgeformen oppnår en relativt god tilgjengelighet på frekvensene over predikert MUF. En mulig årsak til denne tilgjengeligheten kan være "off great circle" refleksjon. Dette betyr at refleksjon oppstår på siden av korteste vei mellom sender og mottager, muligens innenfor nordlysområdet, og dette resulterer i en lang bane med svakere SNR. På en slik bane vil lokal sterk ionisasjon gjøre at høyere frekvenser kan brukes. Svakere SNR oppstår som følge av et lengere banestrek, eller bølgeutbredelse via antennens sidelover som gir et svakere signal. Signalspredninger oppstår fordi refleksjonen skjer i et dynamisk område. Off great circle refleksjon kan ikke fastslås med sikkerhet uten TOF målinger og retningsbestemmelse av det mottatte signalet, men antas å være årsak til bølgeutbredelsen observert på frekvensene over predikert MUF.

For den ikke-robuste bølgeformen oppnås det ingen tilgjengelighet for frekvensene over MUF. Årsaken til dette er at SNR faller under bølgeformens ytelsesområde.

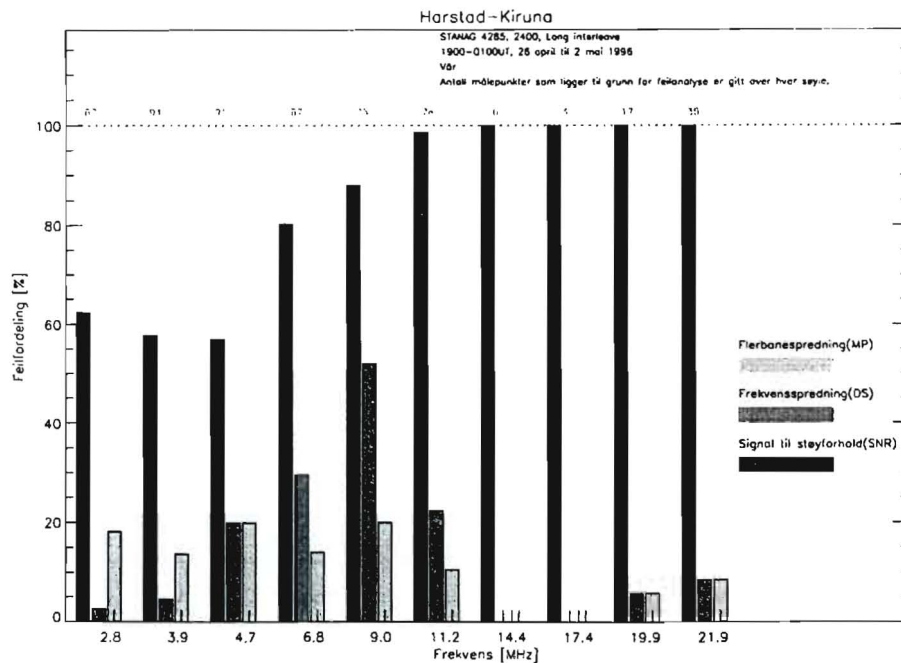
7.1.3 Feilende kanalparameter

Figur 7.8 og 7.9 viser fordelingen til de feilende parametere for hver DAMSON frekvens.



Figur 7.8 Feilende kanalparameter om dagen for STANAG 4285 (2400 bps).

For den ikke-robuste bølgeformen er det hovedsaklig SNR som er årsak til at denne bølgeformen feiler. Dette er en naturlig konsekvens ut fra bølgeformens simulerte ytelse som viser at SNR må være større enn 12 dB. I figur 7.1 kan det sees at gjennomsnittlig SNR for de tre laveste frekvensene ligger rundt 12 dB, mens SNR faller for frekvensene over MUF.



Figur 7.9 Feilende kanalparameter om natten for STANAG 4285 (2400 bps).

På dagtid (figur 7.8) er tidsspredning i tillegg en årsak til at den ikke-robuste bølgeformen feiler. Figur 7.3 viser tydelig hvordan gjennomsnittlig tidsspredning for frekvensene rundt 10 MHz ligger i området 5 til 7 ms. Simulerte ytelser til den ikke-robuste bølgeformen viser at den slutter å fungere ved tidsspredninger av denne størrelse, noe avhengig av frekvensspredningen. Frekvensspredning er ikke en årsak til at bølgeformen feiler på dagtid. Dette kan også relateres til figur 7.2 hvor frekvensspredningen for alle frekvenser er nesten neglisjerbar.

I nattperioden (figur 7.9) er det fortsatt SNR som er den viktigste årsak til at den ikke-robuste bølgeformen feiler. Derimot er frekvensspredning en større årsak til feiling enn tidsspredning om natten. I figur 7.2 er gjennomsnittlig frekvensspredning for frekvensene rundt 10 MHz i området 5 til 10 Hz. Simulerte ytelser for den ikke-robuste bølgeformen viser at bølgeformen feiler ved frekvensspredninger i området 5-6 Hz, noe avhengig av tidsspredningen.

For den robuste bølgeformen er det bare SNR som er årsak til feiling. I nesten alle tilfeller ligger de målte tids- og frekvensspredningene innenfor de simulerte verdier, og dermed kan vi si at tids- og frekvensspredninger ikke begrenser denne bølgeformen.

7.1.4 Diskusjon

Som forventet er det best tilgjengelighet for frekvensene under MUF. Det som er mer overraskende er at den robuste bølgeformen oppnår en relativt god tilgjengelighet også for frekvensene over MUF. Det kan altså være mulig å basere radiokommunikasjon på denne banestrekningen på frekvenser i nesten hele HF-båndet fra 2 til 21 MHz ved å benytte STANAG 4415 (75 bps). Både for STANAG 4285 (2400 bps) og STANAG 4415 (75 bps) er det SNR som er den viktigste årsak til feiling. Tids- og frekvensspredning er i tillegg en årsak til at STANAG 4285 (2400 bps) feiler.

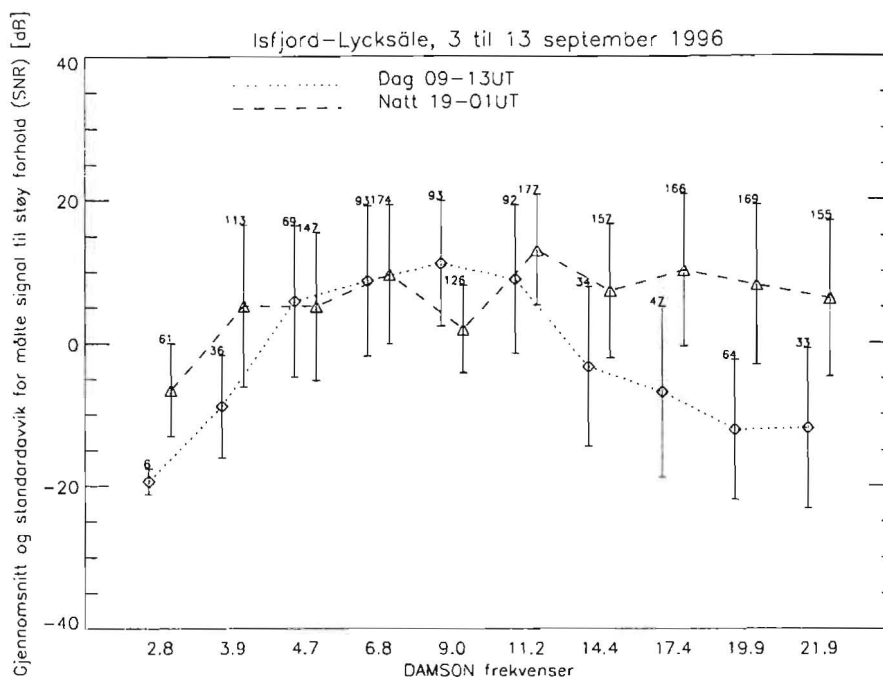
7.2 Isfjord – Lycksäle

Denne nord-sydøst banen er delvis dekket av nordlysovalen, og kan være fullstendig dekket i forstyrrede perioder.

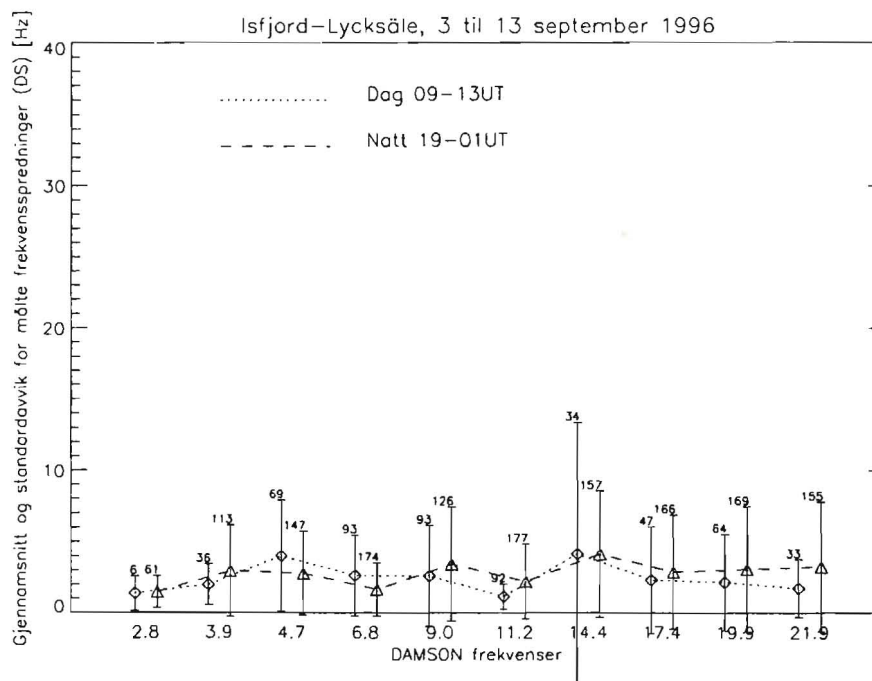
Det er utført analyser fra den kontinuerlige perioden 3 til 13 september 1996. I denne 11 dagers perioden er det mulig å utføre 1584 målinger på hver frekvens. Det maksimalt registrerte antall målinger er 631. Prediktert MUF på denne 1500 km lange banen er fra 12 til 13 MHz på dagtid, og fra 10 til 12 MHz om natten. Perioden er lite forstyrret med en K_p -indeks i området 1 til 4. Det er observert frekvensspredninger over 10 Hz og tidsspredninger over 5 ms, men i en mer forstyrret periode antas det å være store signalspredninger på denne banen siden den da er fullstendig dekket av nordlysovalen.

7.2.1 Oversikt over målte kanalparametere i perioden

Figur 7.10, 7.11 og 7.12 viser fordelingene av målingene med hensyn på SNR, DS og MP i perioden.



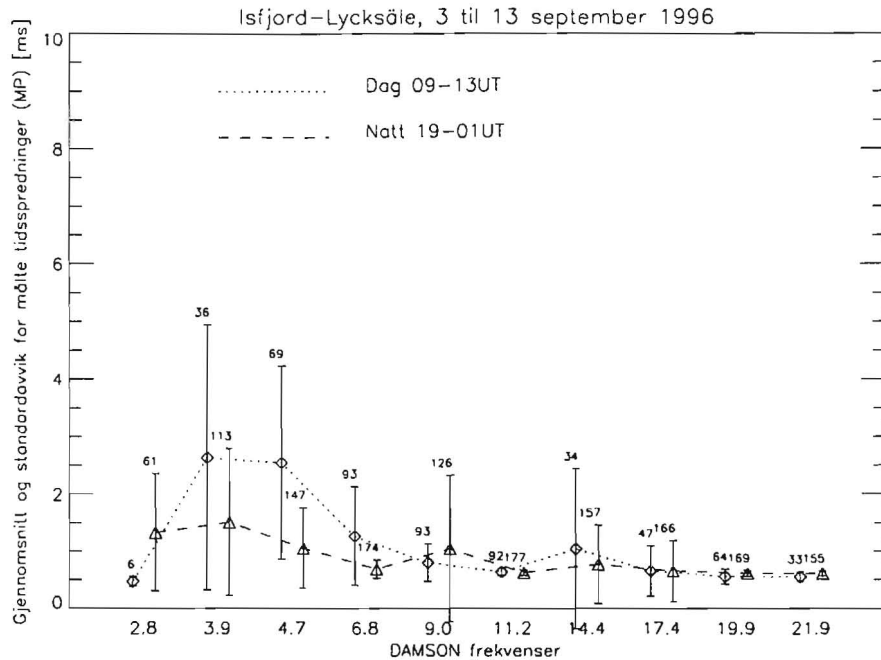
Figur 7.10 Gjennomsnitt og standardavvik for SNR på dag og om natt. Antallet punkter som ligger til grunn for beregningene er gitt over hver standardavviksøyle.



Figur 7.11 Gjennomsnitt og standardavvik for frekvensspredning på dag og om natt. Antallet punkter som ligger til grunn for beregningene er gitt over hver standardavviksøyle.

På dagtid er SNR best for frekvensene like under MUF, og faller for frekvensene over MUF. På grunn av absorpsjon er SNR på dagtid svært lav for de aller laveste frekvensene. Om natten er målt SNR like god for frekvensene like under MUF og frekvensene over MUF.

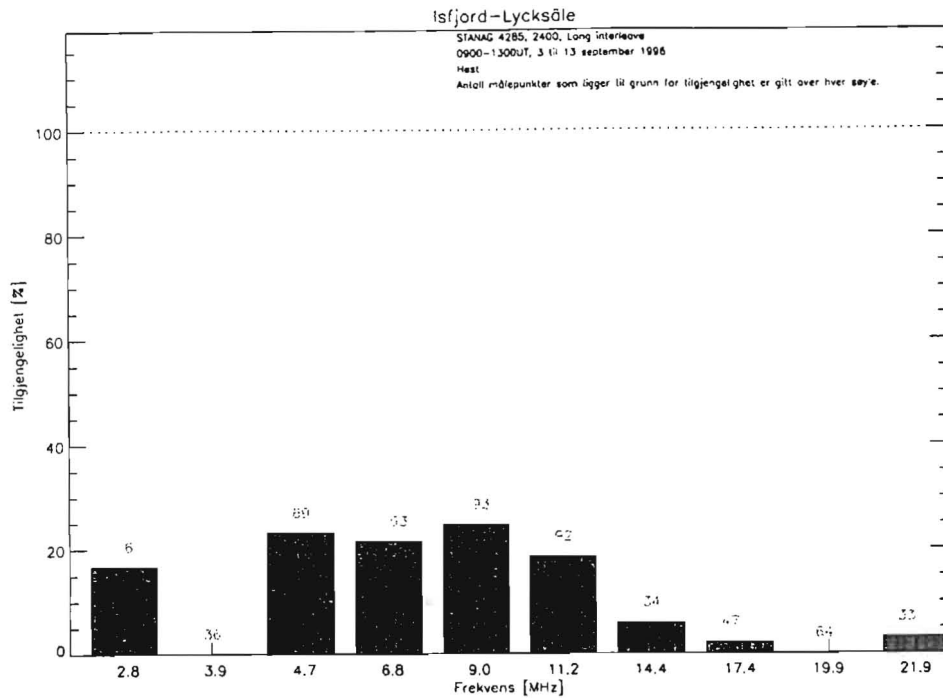
Både tids- og frekvensspredning er lave for alle frekvenser på dag og om natt med unntak av tidsspredning for 3.9 og 4.7 MHz på dagtid. Her er tidsspredningen noe større.



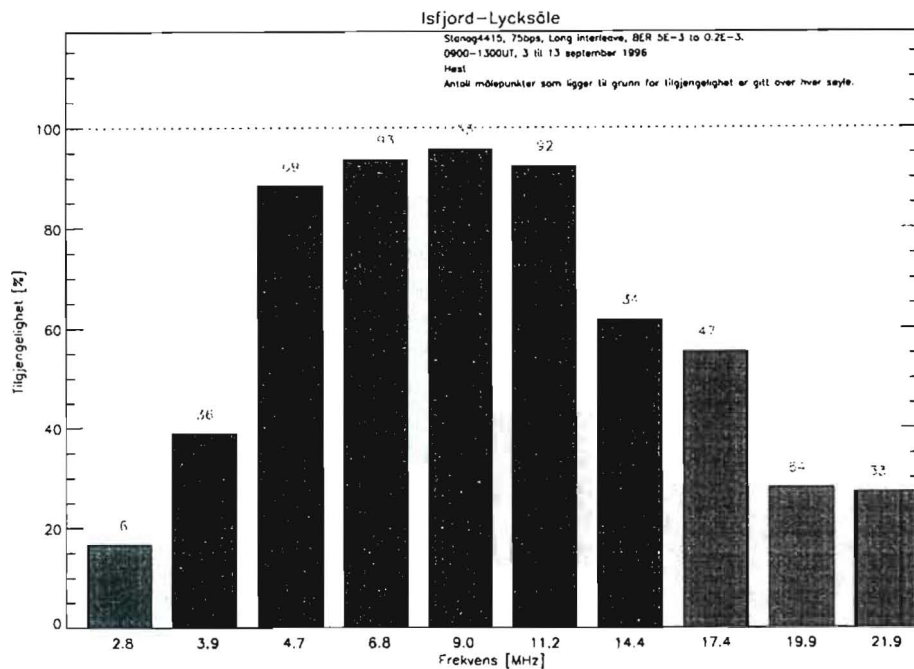
Figur 7.12 Gjennomsnitt og standardavvik for tidsspredning på dag og om natt. Antallet punkter som ligger til grunn for beregningene er gitt over hver standardavviksøyle.

7.2.2 Modemtilgjengelighet i perioden

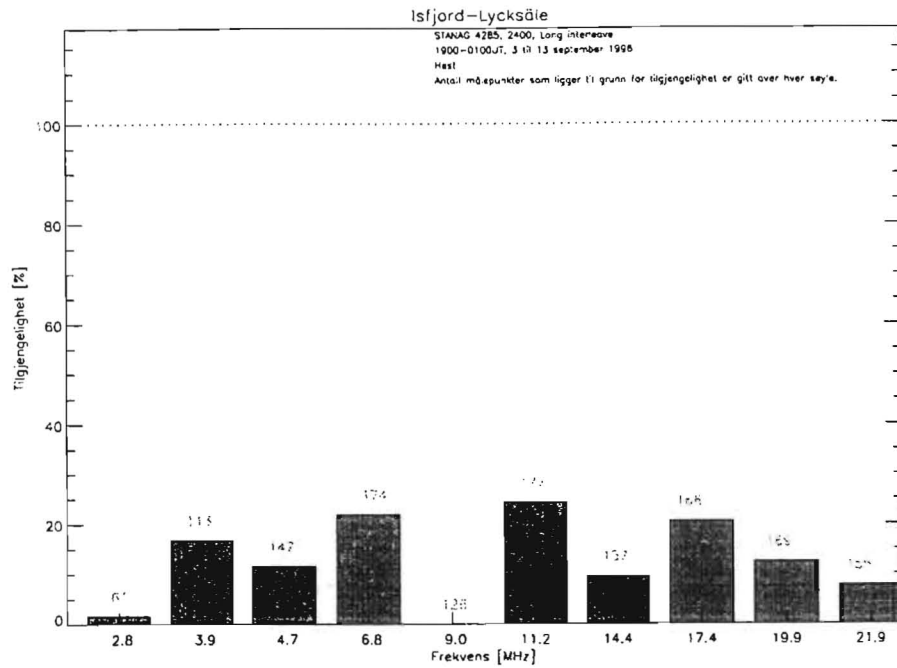
Figur 7.13 til 7.16 viser modemtilgjengelighet på dagen og om natten for den ikke-robuste og robuste bølgeformen. På dagtid oppnås det best tilgjengelighet for frekvensene under MUF for begge bølgeformene. Unntatt er de laveste frekvensene hvor det er absorpsjon. I tillegg oppnås det en god tilgjengelighet for den robuste bølgeformen for frekvensene over MUF.



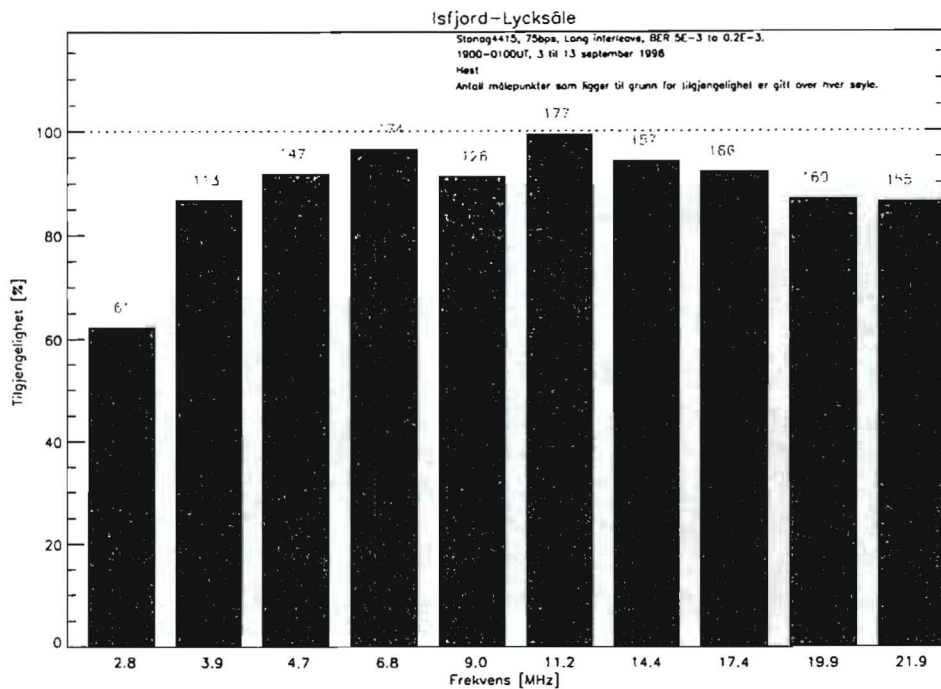
Figur 7.13 Modemtilgjengelighet for STANAG 4285 (2400 bps) for hver enkelt DAMSON frekvens på dagen i perioden 3 til 13 september 1996. MUF=12 til 13 MHz.



Figur 7.14 Modemtilgjengelighet for STANAG 4415 (75 bps) for hver enkelt DAMSON frekvens på dagen i perioden 3 til 13 september 1996. MUF=10 til 12 MHz.



Figur 7.15 Modemtilgjengelighet for STANAG 4285 (2400 bps) for hver enkelt DAMSON frekvens om natten i perioden 3 til 13 september 1996. MUF=12 til 13 MHz.

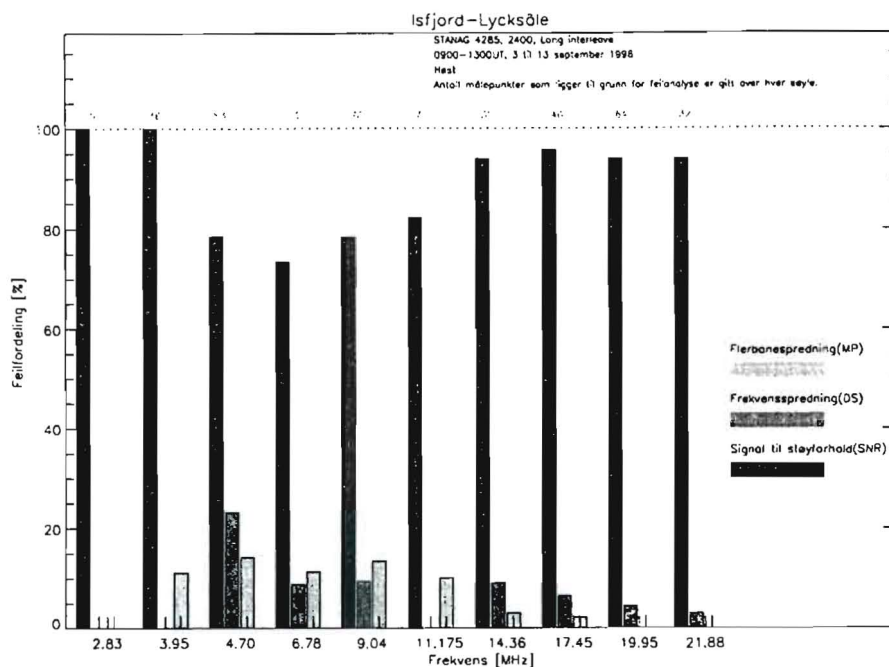


Figur 7.16 Modemtilgjengelighet for STANAG 4415 (75 bps) for hver enkelt DAMSON frekvens om natten i perioden 3 til 13 september 1996. MUF=10 til 12 MHz.

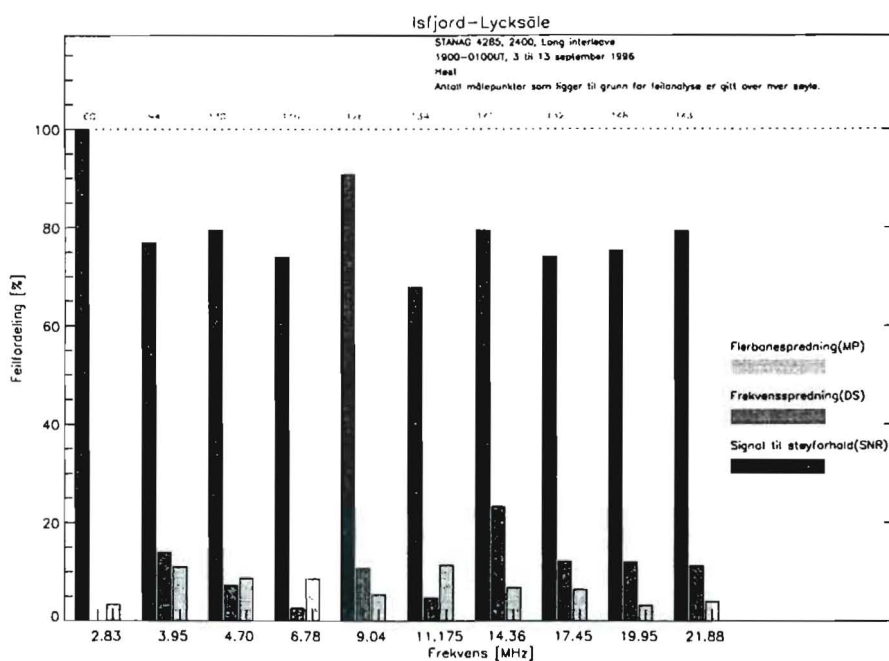
Om natten oppnår den robuste bølgeformen svært god tilgjengelighet på alle frekvenser, mens den ikke-robuste bølgeformen oppnår bedret tilgjengelighet på de høyere frekvensene i forhold til dagtid.

7.2.3 Feilende kanalparameter

Figur 7.17 og 7.18 viser fordelingen til de feilende parametre for hver DAMSON frekvens.



Figur 7.17 Feilende kanalparameter om dagen for STANAG 4285 (2400 bps).



Figur 7.18 Feilende kanalparameter om natten for STANAG 4285 (2400 bps).

Både for dag og natt for den ikke-robuste bølgeformen er det SNR som er den klart viktigste årsaken til feiling. Tids- og frekvensspredning feiler i noen tilfeller (inntil 20 % for noen frekvenser). Dette er i samsvar med de målte verdier som ligger i området rundt bølgeformens ytelsesområde. For den robuste bølgeformen er det bare SNR som feiler. Tids- og frekvensspredningene ligger innenfor bølgeformens toleransegrenser.

7.2.4 Diskusjon

Også denne banen viser tydelig at den robuste bølgeformen oppnår en markert forbedring i tilgjengelighet i forhold til den ikke-robuste bølgeformen. Det som er interessant i sammenligningen mellom natt- og dag er den forbedrede tilgjengeligheten på frekvensene over MUF om natten. Den robuste bølgeformen oppnår omtrent den samme høye tilgjengelighet på alle frekvenser om natten, mens tilgjengeligheten på dagtid reduseres på de laveste og høyeste frekvensene. Forbedringen i tilgjengelighet på de høyeste frekvensene om natten kan skyldes "off great circle" refleksjoner fra ionisasjon innenfor nordlysovalen som dekker større deler av banen om natten.

Den ikke-robuste bølgeformen viser seg å være tilgjengelig på flere frekvenser om natten enn om dagen.

SNR er den parameter som er den viktigste årsak til at bølgeformene feiler. Tids- eller frekvensspredning vil ikke være noen årsak til at den robuste bølgeformen feiler. Dette skyldes de lave målte spredningsverdiene som ligger godt innenfor ytelsesområdet (40 ms og 40 Hz) til denne bølgeformen, se figur 7.11 og figur 7.12. For den ikke-robuste bølgeformen er tids- og frekvensspredning en feilende årsak i noen tilfeller, men det er fortsatt SNR som er den viktigste årsak. I følge de målte spredningene som viser tidsspredning inntil 5 ms og frekvensspredning inntil 5 Hz, så kan disse to parameterene være årsak til at den ikke-robuste bølgeformen feiler. Ytelsesområdet til den ikke-robuste bølgeformen er avgrenset av en tidsspredning på 5 ms og en frekvensspredning på 5 Hz, se figur 4.3.

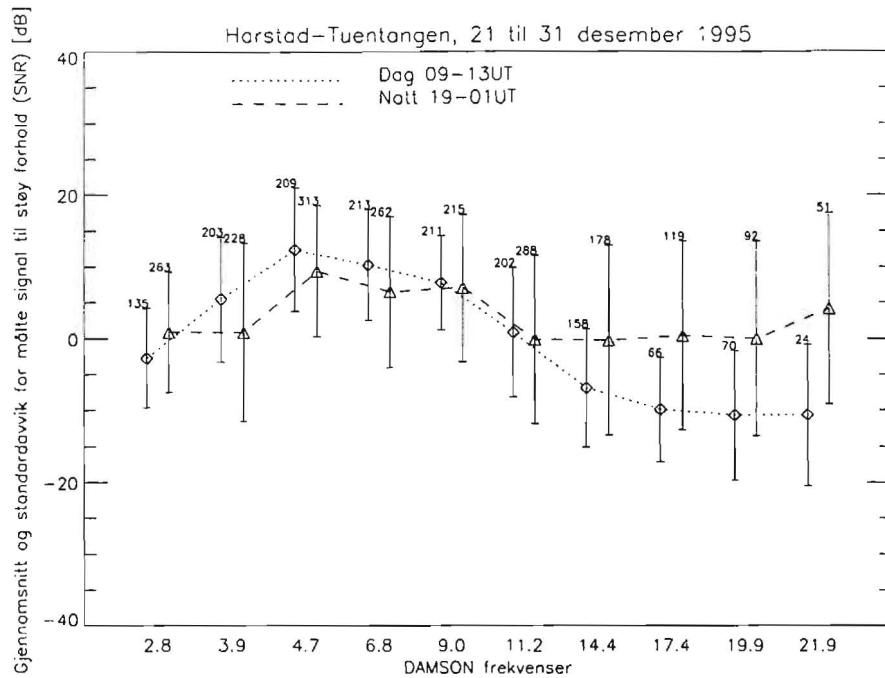
7.3 Harstad - Tuentangen

Denne nord-sør banen ligger vanligvis syd for nordlysområdet, men kan ligge delvis innenfor i kraftig forstyrrede perioder.

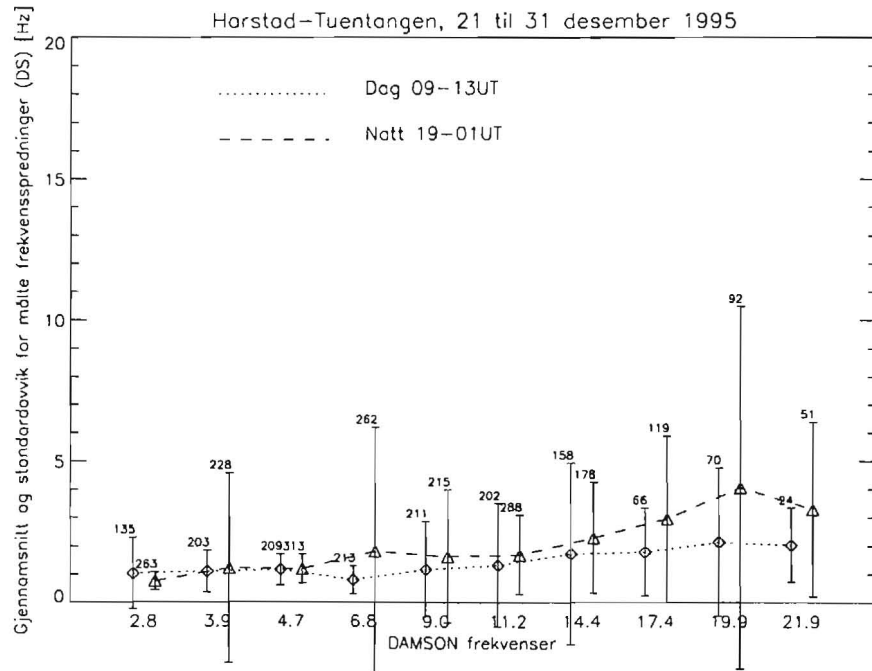
Det er utført analyser fra den kontinuerlige perioden 21 til 31 desember 1995. I denne 11 dagers perioden er det mulig å utføre 1584 målinger på hver frekvens. Det maksimalt registrerte antall målinger er 1282. Prediktert MUF på denne 981 km lange banen er 10 til 12 MHz om dagen og 4 til 6 MHz om natten. Perioden er uforstyrret med en K_p -indeks i området 1 til 3. Det antas derfor med sikkerhet at nordlysområdet ligger nord for denne banen, og det er forventet små signalspredninger.

7.3.1 Oversikt over målte kanalparametere i perioden

Figur 7.19, 7.20 og 7.21 viser fordelingene av målingene med hensyn på SNR, DS og MP i perioden.



Figur 7.19 Gjennomsnitt og standardavvik for SNR på dag og om natt. Antallet punkter som ligger til grunn for beregningene er gitt over hver standardavviksøyle.

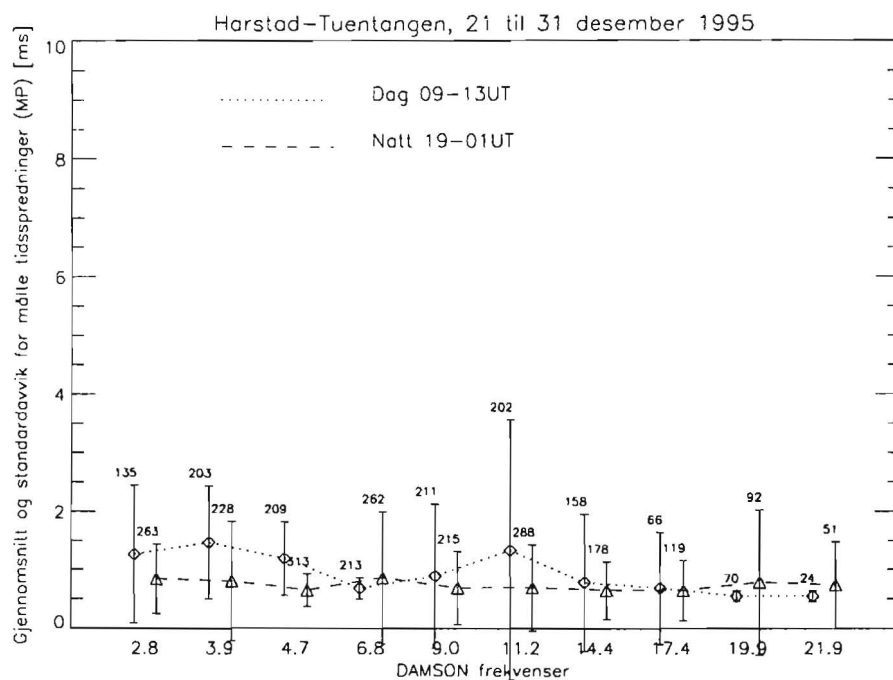


Figur 7.20 Gjennomsnitt og standardavvik for frekvensspredning på dag og om natt. Antallet punkter som ligger til grunn for beregningene er gitt over hver standardavviksøyle.

På dagtid er gjennomsnittlig SNR større enn 0 dB (inntil 10 dB) for frekvensene under MUF, unntatt den laveste frekvensen som er utsatt for absorpsjon. Som forventet avtar gjennomsnittlig SNR for frekvensene over MUF.

Om natten har de laveste frekvensene under MUF og frekvensene over MUF stort sett den samme gjennomsnittlige SNR (0 dB). Denne forskjellen mellom dag og natt kan skyldes interferens på dagtid forårsaket av større HF-aktivitet og en annen ionosfærisk lagdeling.

For hele perioden er det målt små frekvensspredninger på alle frekvenser. Sett i sammenheng med den geomagnetiske aktiviteten i denne perioden og banens beliggenhet er dette et forventet resultat.



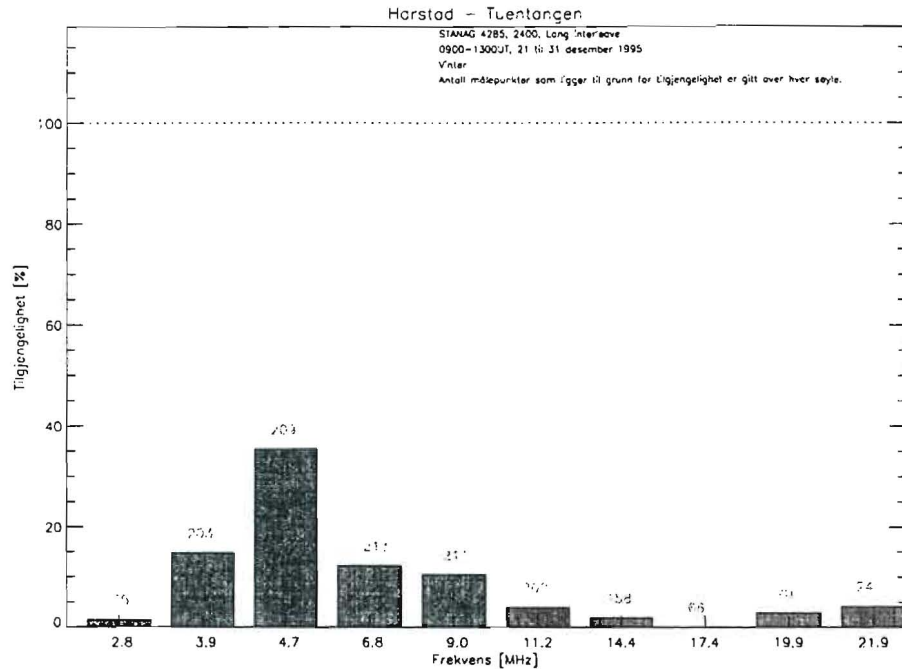
Figur 7.21 Gjennomsnitt og standardavvik for tidsspredning på dag og om natt. Antallet punkter som ligger til grunn for beregningene er gitt over hver standardavviksøyle.

Tidsspredning er lav for alle frekvenser og er mindre enn 2 ms. Som for frekvensspredning er dette forventet i en rolig periode.

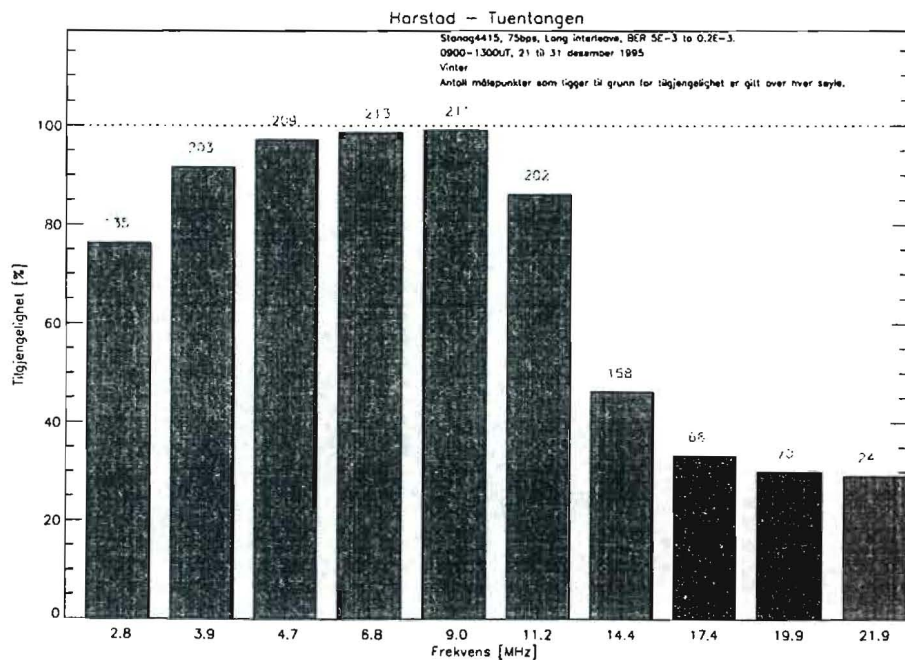
7.3.2 Modemtilgjengelighet i perioden

Figur 7.22 til 7.25 viser modemtilgjengelighet på dagen og om natten for den ikke-robuste og robuste bølgeformen. Om dagen oppnår den ikke-robuste bølgeformen best tilgjengelighet på frekvensene godt under MUF. Den beste tilgjengeligheten oppnås på 4.7 MHz (over 35 %) som er dobbelt så god som den nest beste tilgjengeligheten, på 3.95 MHz (mindre

enn 15 %). Årsaken til dette er at gjennomsnittlig SNR på 4.7 MHz ligger like over den ikke-robuste bølgeformens simulerte ytelsesområde (bedre enn 10 dB). For frekvensene over MUF oppnås det en dårlig tilgjengelighet på grunn av lav SNR. Den reduserte tilgjengeligheten om dagen for frekvensene over MUF er på grunn av redusert SNR.

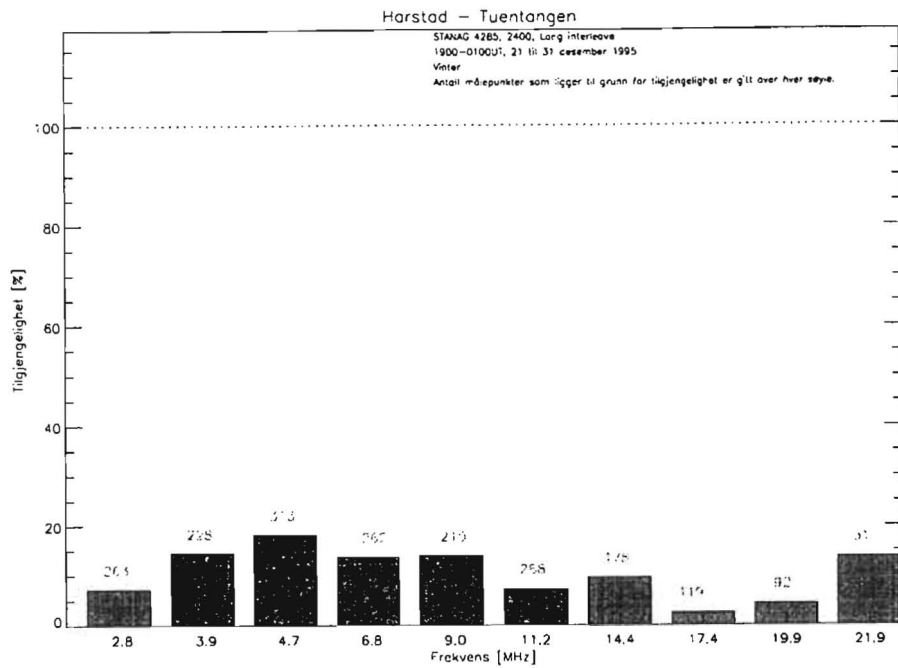


Figur 7.22 Modemtilgjengelighet for STANAG 4285 (2400 bps) for hver enkelt DAMSON frekvens på dagtid i perioden 21 til 31 desember 1995. MUF ~ 10 MHz.

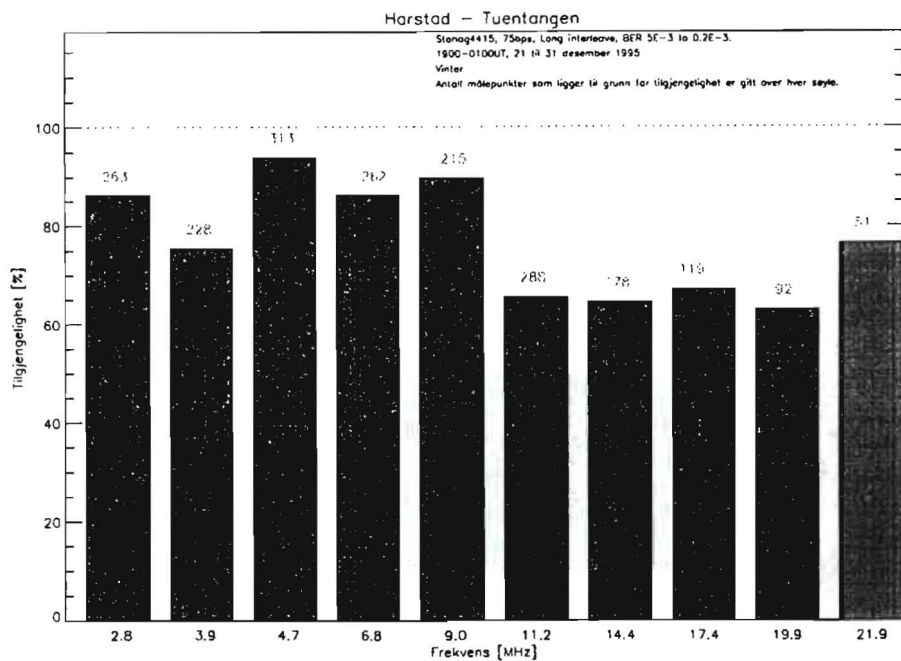


Figur 7.23 Modemtilgjengelighet for STANAG 4415 (75 bps) for hver enkelt DAMSON frekvens på dagtid i perioden 21 til 31 desember 1995. MUF ~ 10 MHz.

Den robuste bølgeformen oppnår en svært god tilgjengelighet på dagtid (opp til 95 %) for frekvensene under MUF. For frekvensene over MUF oppnås det en bra tilgjengelighet (over 40 %), men med et lite antall målinger.



Figur 7.24 Modemtilgjengelighet for STANAG 4285 (2400 bps) for hver enkelt DAMSON frekvens om natten i perioden 21 til 31 desember 1995. MUF ~ 5 MHz.

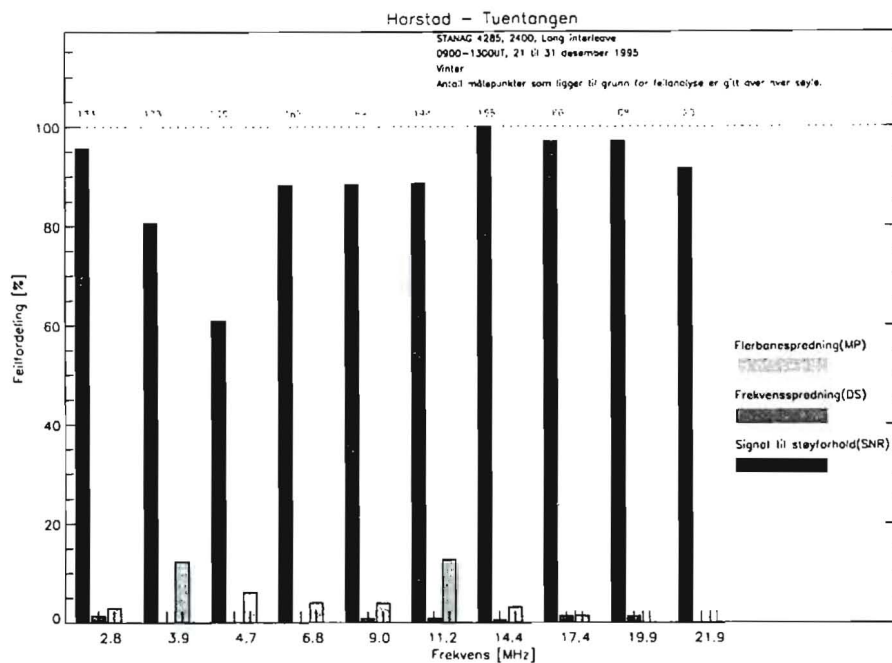


Figur 7.25 Modemtilgjengelighet for STANAG 4415 (75 bps) for hver enkelt DAMSON frekvens om natten i perioden 21 til 31 desember 1995. MUF ~ 5 MHz

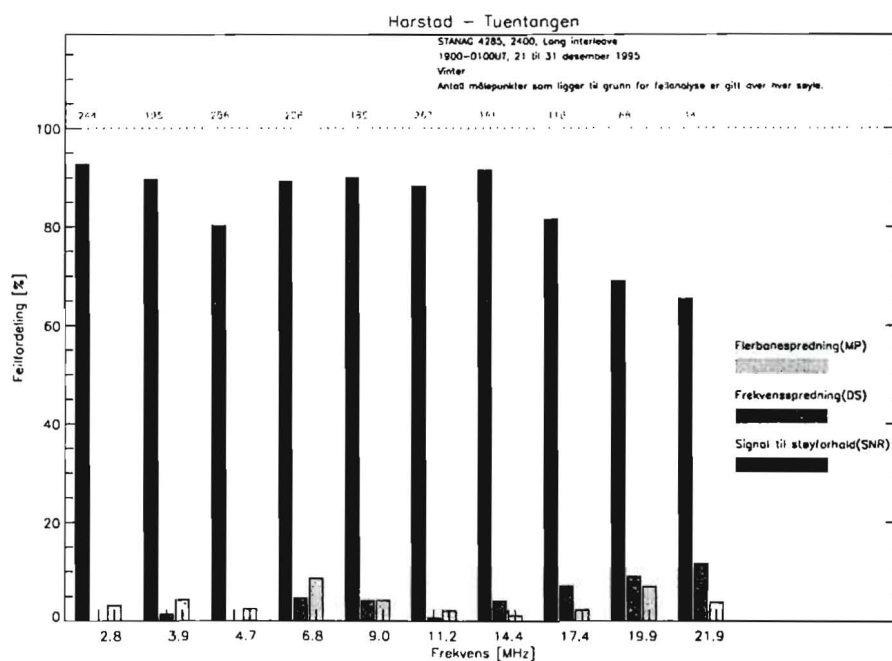
Om natten viser ikke analysene noe klart skille mellom frekvensene under og over MUF. For begge bølgeformene oppnås det en økning i tilgjengeligheten på frekvensene over MUF sammenlignet med dagtid. Årsaken til dette er økningen i SNR om natten for frekvensene over MUF, som muligens kan skyldes mindre interferens.

7.3.3 Feilende kanalparameter

Figur 7.26 og figur 7.27 viser fordelingen av feilende parameter for alle DAMSON frekvensene for den ikke-robuste bølgeformen.



Figur 7.26 Feilende kanalparameter om dagen for STANAG 4285 (2400 bps).



Figur 7.27 Feilende kanalparameter om natten for STANAG 4285 (2400 bps).

På denne banen er det SNR som er den klart viktigste årsaken til at begge bølgeformene feiler. Tids- og frekvensspredning har en svært liten innvirkning som feilende parametere. De målte signalspredningene ligger innenfor ytelsesområdet til begge bølgeformene.

7.3.4 Diskusjon

Her er det som forventet best tilgjengelighet for frekvensene under MUF, men god tilgjengelighet oppnås for den robuste bølgeformen også på frekvensene over MUF om natten. Modemtilgjengeligheten for denne banen er relativt lik den for Isfjord-Lycksäle og dette kan begrunnes i at for de aktuelle periodene ligger begge banene sør for nordlysovalen, banene er omtrent like lange og begge går i nord-sør retning.

På grunn av at dette er en bane sør for nordlysovalen, er ikke tid- eller frekvensspredning noen viktig årsak til at bølgeformene feiler.

7.4 Isfjord – Tuentangen

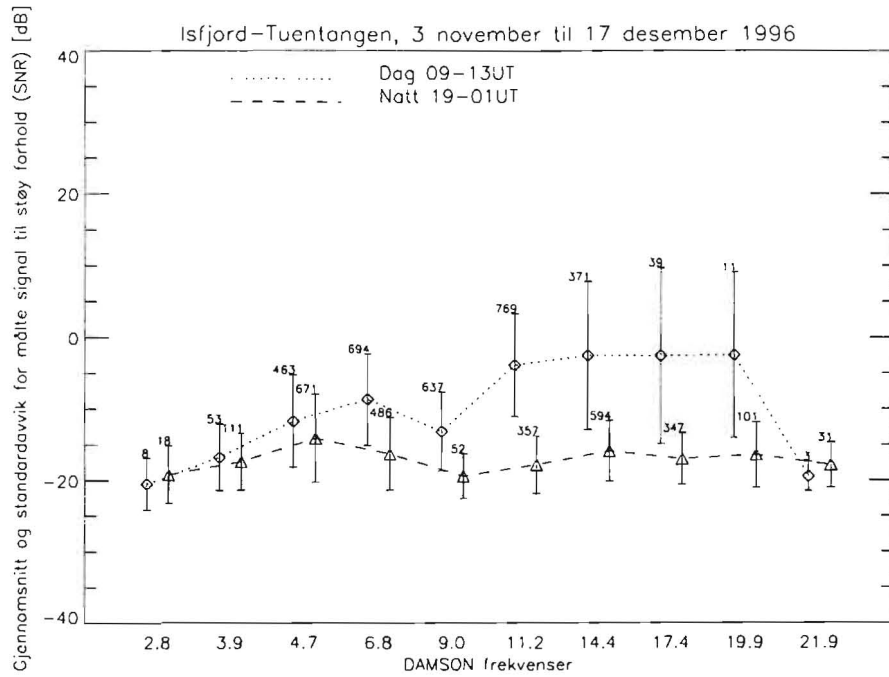
Denne nord-sør banen på 2016 km ligger delvis dekket av nordlysområdet i uforstyrrede perioder. I forstyrrede perioder kan nordlysområdet dekke banen ned til midt-Norge.

Det er utført analyser fra perioden 4 november til 17 desember 1996. Det var tilgjengelig data fra 42 av 45 mulige dager. I denne 45 dagers perioden er det mulig å utføre 5897 målinger på hver frekvens. Det maksimalt registrerte antall målinger er 2955. Prediktert MUF på denne banen er 14 til 15 MHz på dagtid og 11 til 12 MHz om natten. Perioden er uforstyrret med en K_p -indeks i området 1 til 3. Det kan forventes noe signalspredning.

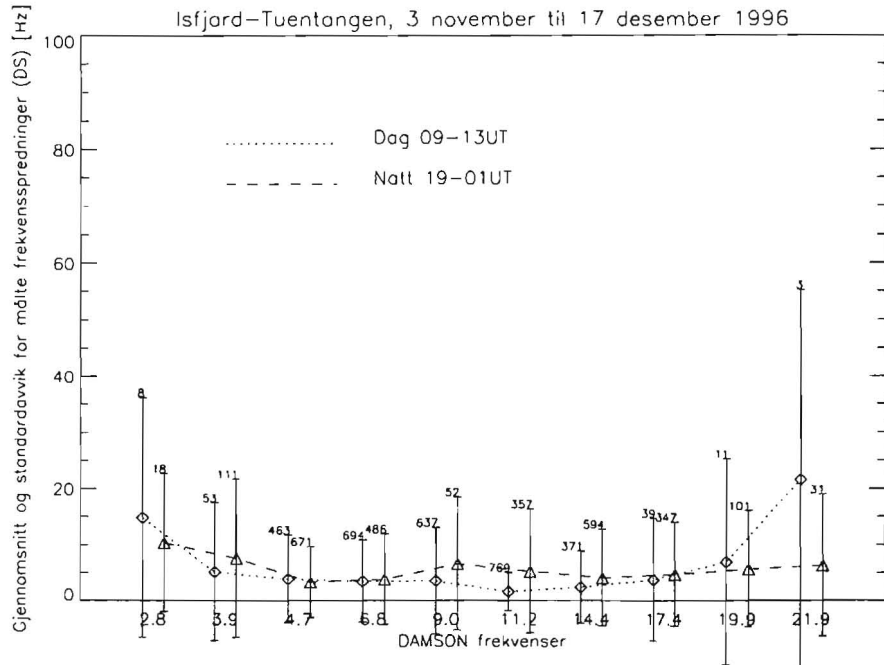
Denne dataserien er beheftet med en målefeil. Ved årsskiftet 1996 til 1997 ble det oppdaget et brudd i antennen på Tuentangen, og vi har grunn til å tro at dette bruddet har eksistert i hele måleperioden. Hvis bruddet oppsto i perioden ville dette være synlig ved en klar reduksjon i gjennomsnittlig SNR. Vi har likevel valgt å utføre analyser siden dette var de eneste målingene som var tilgjengelige på denne banestrekningen.

7.4.1 Oversikt over målte kanalparametere i perioden

Figur 7.28, 7.29 og 7.30 viser fordelingene av målingene med hensyn på SNR, DS og MP i perioden. På grunn av antennebruddet er det målt lave SNR (mindre enn 0 dB) på alle DAMSON frekvensene. Antennebruddet vil ha forårsaket tap av målinger.



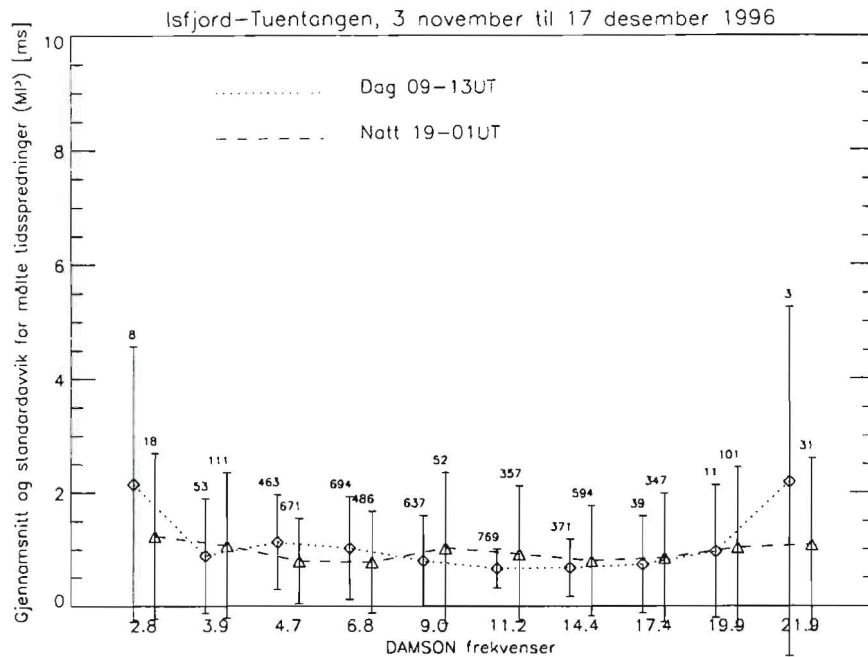
Figur 7.28 Gjenomsnitt og standardavvik for SNR på dag og om natt. Antallet punkter som ligger til grunn for beregningene er gitt over hver standardavviksøyle.



Figur 7.29 Gjenomsnitt og standardavvik for frekvensspredning på dag og om natt. Antallet punkter som ligger til grunn for beregningene er gitt over hver standardavviksøyle.

På dagtid viser figur 7.28 at de beste SNR-forholdene er målt på de to frekvensene like under MUF. Frekvensene like over MUF viser også SNR-forhold tilsvarende de to frekvens-

ne like under MUF, men her er det registrert et svært lite antall målinger. Om natten er det ingen forskjell mellom SNR under og over MUF.



Figur 7.30 Gjennomsnitt og standardavvik for tidsspredning på dag og om natt. Antallet punkter som ligger til grunn for beregningene er gitt over hver standardavviksøyle.

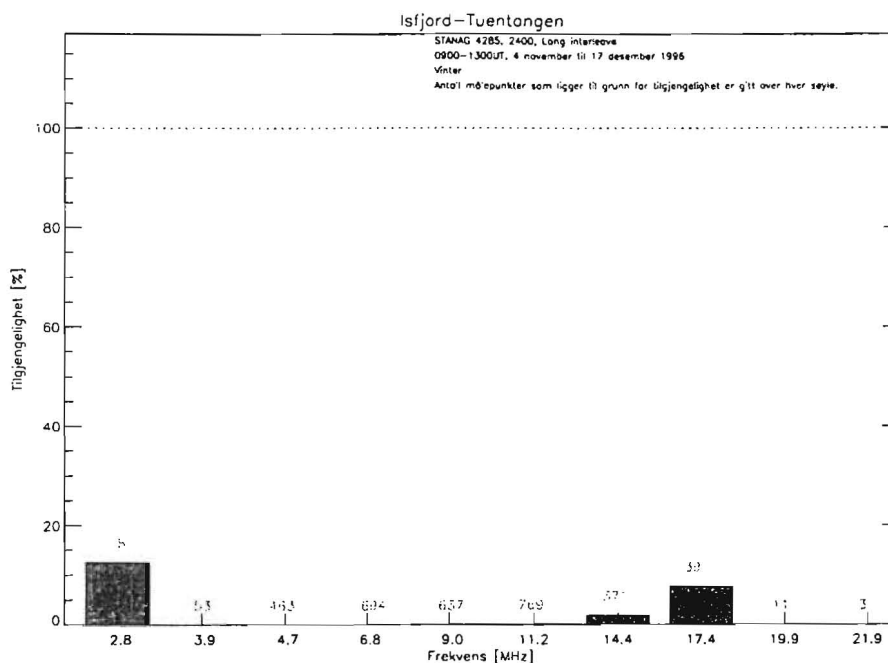
Frekvensspredning (figur 7.29) er moderat, med gjennomsnittsverdier i området 5 til 10 Hz. Årsaken til de moderate målingene er et mulig refleksjonspunkt i nordlysområdet og variasjoner i den geofysiske aktiviteten over en så lang periode (43 dager).

Tidsspredning (figur 7.30) er liten i hele perioden. Dette tyder på stabile signalbaner.

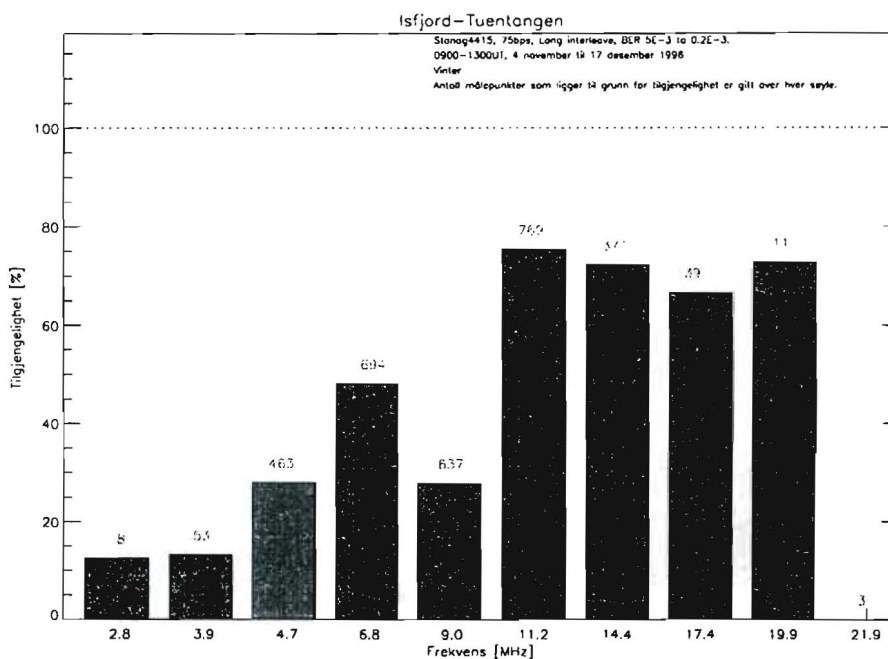
7.4.2 Modemtilgjengelighet i perioden

Figur 7.31 til figur 7.34 viser modemtilgjengelighet på dag og om natten for den ikke-robuste og robuste bølgeformen. På dagtid viser analysene at den robuste bølgeformen oppnår en god tilgjengelighet (over 70 % på enkelte frekvenser) i forhold til den ikke-robuste. Vi ser bort fra resultatene til frekvensene over 15 MHz på grunn av det lave antallet målinger.

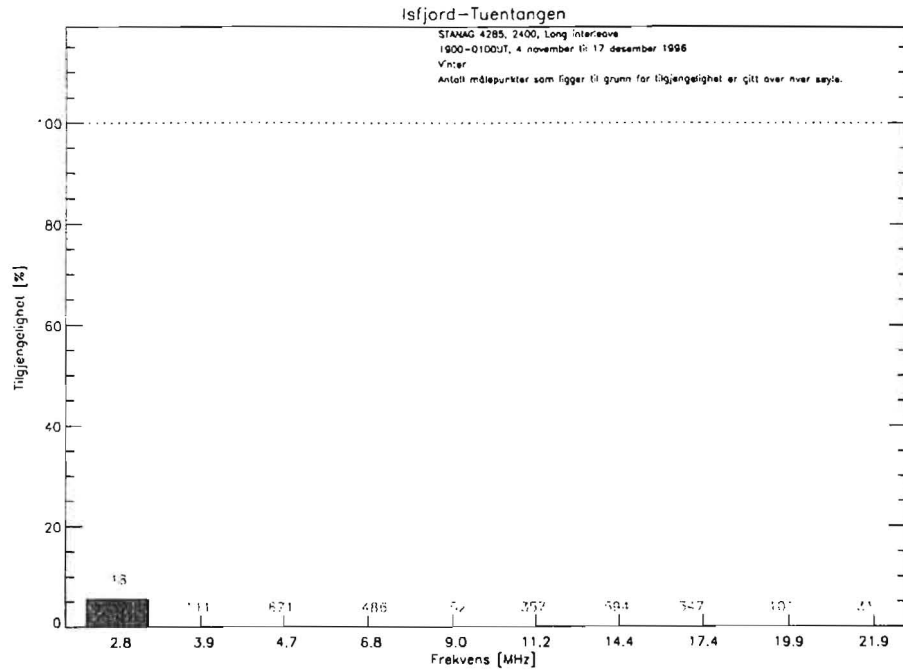
Om natten er ikke den robuste bølgeformen mye bedre enn den ikke-robuste, men her er også gjennomsnittlig SNR generelt svært lav på alle frekvenser (-15 til -20 dB) og ligger under både den robuste og den ikke-robuste bølgeformens simulerte ytelse.



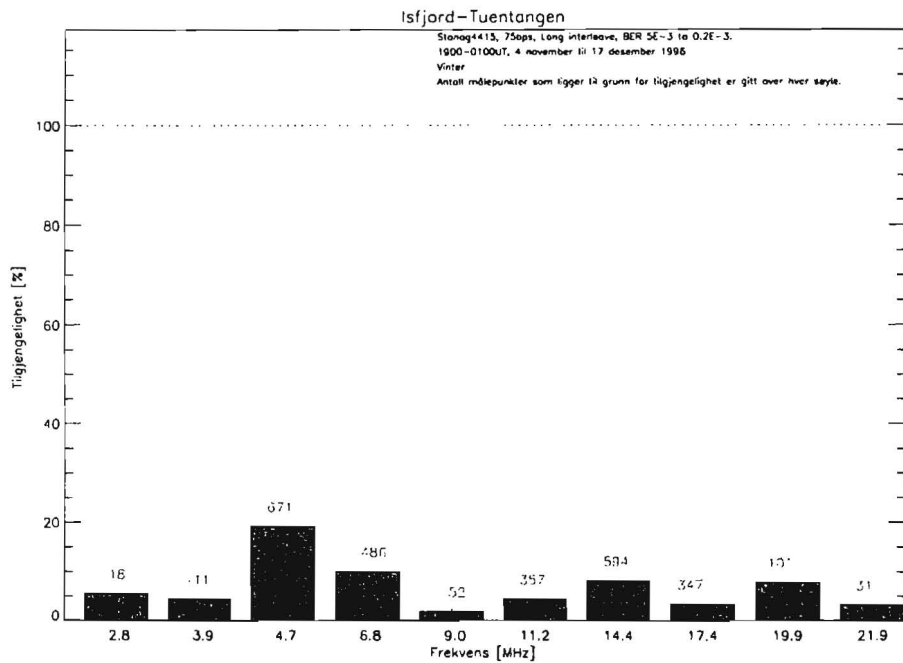
Figur 7.31 Modemtilgjengelighet for STANAG 4285 (2400 bps) for hver enkelt DAMSON frekvens på dagtid i perioden 4 november til 17 desember 1996. MUF=14 til 15 MHz.



Figur 7.32 Modemtilgjengelighet for STANAG 4415 (75 bps) for hver enkelt DAMSON frekvens på dagtid i perioden 4 november til 17 desember 1996. MUF=14 til 15 MHz.



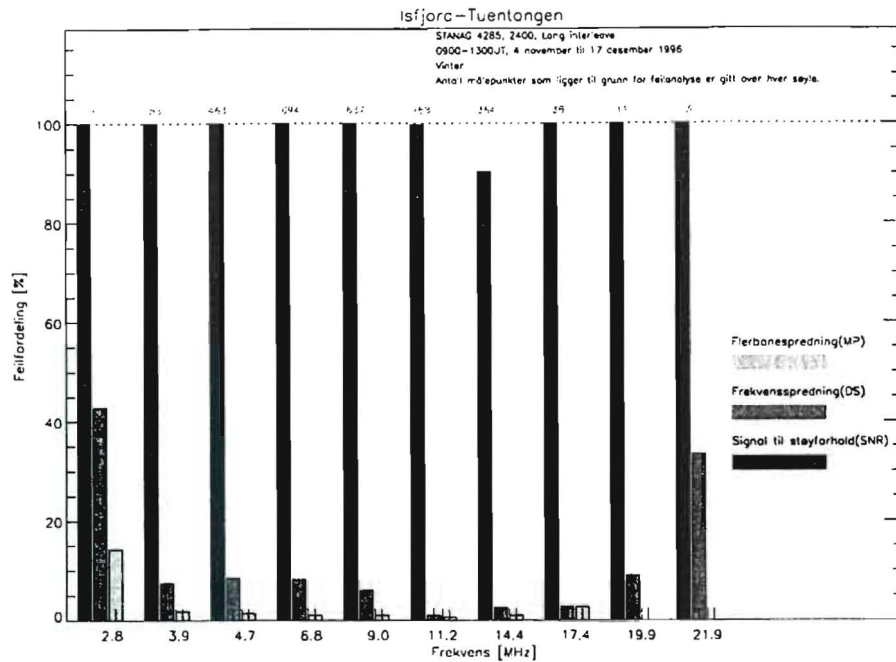
Figur 7.33 Modemtilgjengelighet for STANAG 4285 (2400 bps) for hver enkelt DAMSON frekvens om natten i perioden 4 november til 17 desember 1996. MUF=11 til 12 MHz.



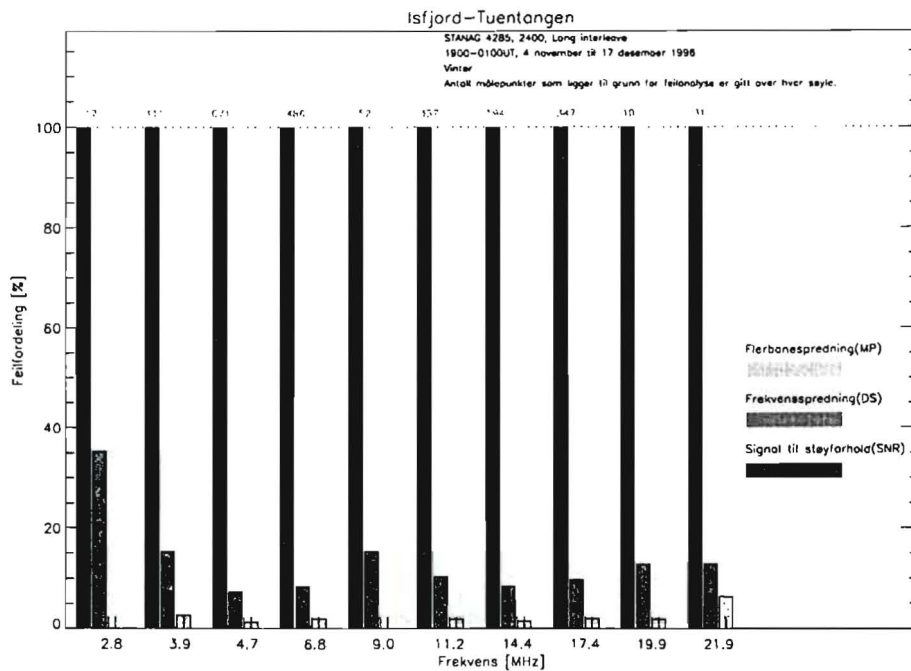
Figur 7.34 Modemtilgjengelighet for STANAG 4415 (75 bps) for hver enkelt DAMSON frekvens om natten i perioden 4 november til 17 desember 1996. MUF=11 til 12 MHz.

7.4.3 Feilende kanalparameter

Figur 7.35 og 7.36 viser fordelingen til de feilende parametere for hver DAMSON frekvens. På dagtid og om natten er det hovedsaklig SNR som er årsak til at den ikke-robuste bølgeformen feiler. Dette er som forventet tatt i betraktning de lave SNR-målingene.



Figur 7.35 Feilende kanalparameter på dagtid for STANAG 4285 (2400 bps).



Figur 7.36 Feilende kanalparameter om natten for STANAG 4285 (2400 bps).

Hverken tids- eller frekvensspredning er viktige årsaker til at den ikke-robuste bølgeformen feiler. Men frekvensspredning har en noe større innvirkning enn tidsspredning. Dette er naturlig siden den gjennomsnittlige frekvensspredning på alle DAMSON frekvensene ligger i ytterkant av den ikke-robuste bølgeformens ytelsesområde.

For den robuste bølgeformen er det bare SNR som er feilende årsak. De målte tids- og frekvensspredninger er godt innenfor ytelsesområdet til den robuste bølgeformen og vil ikke være noen årsak til feiling.

7.4.4 Diskusjon

I denne dataserien har vi altså målinger som er foretatt nærmest uten antenne, det vil si vi sammenligner bølgeformenes ytelse når mottagerantennen er en kabel. På grunn av de svake SNR målingene oppnås det en svært liten tilgjengelighet for STANAG 4285 (2400 bps) både på dag- og nattertid. STANAG 4415 (75 bps) oppnår likevel en god tilgjengelighet (over 70 %) på dagtid med frekvensene like under MUF, selv om gjennomsnittlig målt SNR ligger lavere enn 0 dB. Både for STANAG 4415 (75 bps) og STANAG 4285 (2400 bps) er det SNR som er den viktigste årsak til feiling.

8 FLERFREKVENSTILGJENGELIGHET

I de senere år er det blitt fokusert på å lage automatiske, digitale HF-systemer som selv kan velge beste frekvens, også kalt ARCS (Automatic Radio Control Systems) (19). Slike HF-nettverkssystemer har et sett med tildelte frekvenser (18) som kan gi en god tilgjengelighet ved optimal utnyttelse. Et viktig spørsmål som må besvares i denne sammenheng er: Hvor mange frekvenser er det nødvendig å bruke for å oppnå maksimal tilgjengelighet i et HF-flerfrekvenssystem?

Med data fra de 10 DAMSON frekvensene i HF-båndet målt på omtrent samme tid, er det mulig å se på dette problemet for én link, altså kommunikasjon mellom to punkter. Vi definerer et HF-flerfrekvenssystem til å være en HF-link som har mulighet for å bruke et sett av frekvenser.

8.1 DAMSON-data og flerfrekvenstilgjengelighet

For å beregne en flerfrekvenstilgjengelighet med DAMSON data er det nødvendig å bruke data fra en måleperiode som er mest mulig kontinuerlig i tid. Det vil si at det ikke har oppstått lengere systemfeil i denne perioden, slik at målinger er gått tapt. Kortere brudd i en måleserie som skyldes omstart av målesystemet, eller nedstengning ved lagring av data til eksterne lagringsmedia ignoreres siden de har en liten påvirkning på det endelige resultatet.

Avbrudd i en måleserie på grunn av årsakene beskrevet over, vil normalt ikke vare lenger enn 1 til 2 timer. For en enkelt DAMSON frekvens betyr dette at det vil mangle 6 til 12 av totalt 1000-2000 målinger. Manglende målinger vil i en tilgjengelighetsanalyse for et flerfrekvenssystem føre til en mulig reduksjon i den totale tilgjengelighet. Det totalt antall mulige målinger i en periode beregnes ut fra hvor lang denne perioden er og ikke ut fra hvor mange målinger det faktisk er lagret. Vi beregner altså i denne delen av analysen en annen modemtilgjengelighet enn i kapittel 6.1, en tilgjengelighet som er basert på tid. Dersom målinger mangler i perioden, antar vi at det i denne sammenheng skyldes kanalforhold som er så dårlige at DAMSON systemet ikke kan måle og beregne de nødvendige kanalparametere.

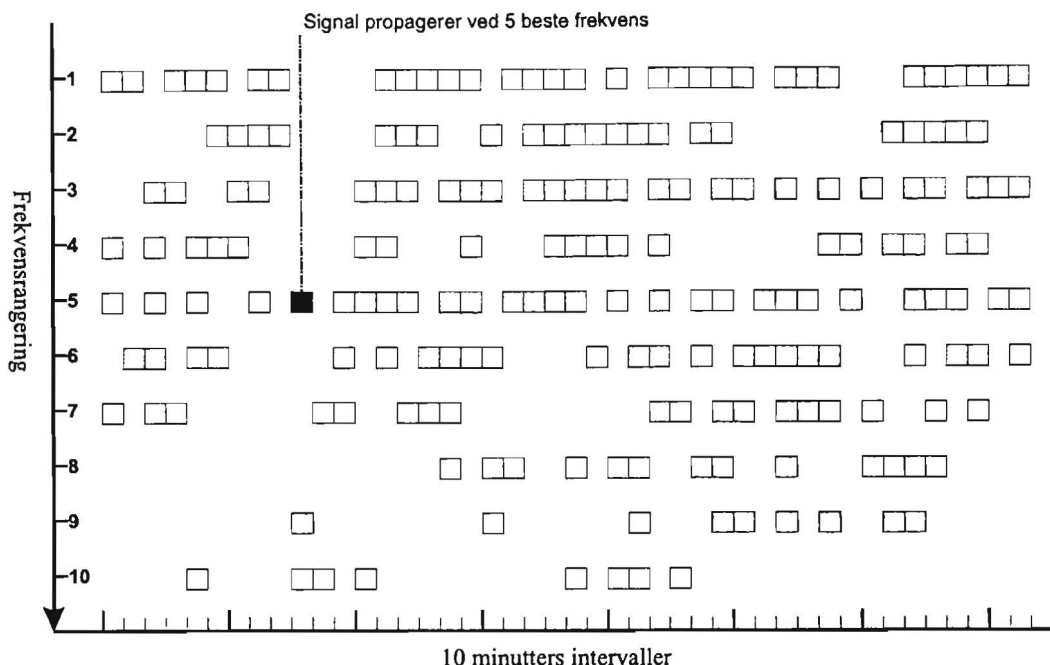
8.2 Frekvensrangering med ICEPAC

Et automatisk flerfrekvenssystem bruker ACS (Automatic Channel Selection) (19) og RTCE (Real Time Channel Evaluation) (20) for å finne frekvensen med størst pålitelighet for å oppnå en best mulig tilgjengelighet. Tradisjonelt har frekvenser blitt rangert og brukt ved hjelp av prediksjonsprogrammer som for eksempel ICEPAC. I appendiks A er det vist en prediksjon utført for banen Isfjord-Lycksåle hvor det er beregnet en pålitelighet for hver enkelt DAMSON frekvens. Denne påliteligheten er gitt som en sannsynlighet for at det mottatte signal overstiger et påkrevd signal til støy forhold. Sannsynligheten for frekvens- og tidsspredning på kanalen er det ikke tatt hensyn til. Frekvensen med størst pålitelighet for en gitt time er den frekvensen som er gitt den beste sannsynligheten. Resultatet av en prediksjon med hensyn på pålitelighet er vist med en rad for hver time, 24 timer i alt, hvor det er beregnet MUF, og pålitelighet for hver frekvens.

8.3 Hvordan beregne flerfrekvenstilgjengelighet

I flerfrekvensanalysen blir alle målinger sortert i forhold til 10 minutters tidsluker, som er den tiden systemet bruker på å måle kanalparametere på alle de 10 DAMSON frekvensene. Deretter foretas en frekvensrangering som beskrevet i kapittel 8.2. Et utsnitt av en slik sortering og rangering er vist i figur 8.1. Frekvens 1 er den frekvensen med størst pålitelighet, frekvens 2 har nest størst pålitelighet, og så videre.

Nå er dataserien ordnet slik at det er klart for å beregne systemets tilgjengelighet med et økende antall frekvenser. Tilgjengeligheten som beregnes er en sann eller total tilgjengelighet siden antallet godkjente målinger sees i forhold til det totalt antall mulige målinger som kan utføres på hver frekvens i hele perioden. Hvert datapunkt blir vurdert i forhold til modemets ytelse på samme måte som i kapittel 6.1.



Figur 8.1 DAMSON data er sortert i 10 minutters tidsluker og rangert etter prediksjon fra ICEPAC. Figuren viser også et tilfelle hvor en økning i tilgjengeligheten for en 10 minutters tidsluke oppnås ved den 5 beste frekvens.

Først beregnes det en tilgjengelighet hvor bare den antatt beste frekvens er tilgjengelig. Dette er frekvens 1 i figur 8.1. Denne tilgjengeligheten beregnes prosentvis for hele dataperioden. Deretter finnes systemets tilgjengelighet, gitt at de antatt to beste frekvensene er tilgjengelige. Nå fungerer analysen slik at hvis datapunktet for den beste frekvensen i et 10 minutters intervall blir godkjent, da blir ikke datapunktet for den nest beste frekvens i det samme intervallet vurdert. Vi vet da allerede at systemet har en frekvens hvor HF-modemet fungerer, og det er ikke nødvendig å teste den nest beste frekvensen. I de tilfeller hvor datapunktet til den beste frekvensen ikke blir godkjent, blir datapunktet til den nest beste frekvensen vurdert. Hvis dette datapunktet blir godkjent, vil dette føre til en økning av systemets tilgjengelighet når det brukes to frekvenser i stedet for én frekvens. Videre beregnes tilgjengeligheten for de tre antatt beste frekvensene og videre til alle de ti DAMSON frekvensene er brukt i tilgjengelighetsanalysen.

Kanalmålingene er som beskrevet utført på 10 minutters intervaller for alle DAMSON frekvensene. Dette betyr at alle kanalmålinger refererer til forskjellig tid. Resultatet av dette er da at første og siste frekvens i et 10 minutters intervall er målt med 9 minutters mellomrom. I resultatene tas det ikke hensyn til dette da det forventes at kanalen ikke endrer seg spesielt i løpet av 10 minutter. Det er vist at kanalparameterene som brukes for å beregne tilgjengelighet endres lite i løpet av dette intervallet (21).

9 RESULTATER FRA FLERFREKVENSTILGJENGELIGHET

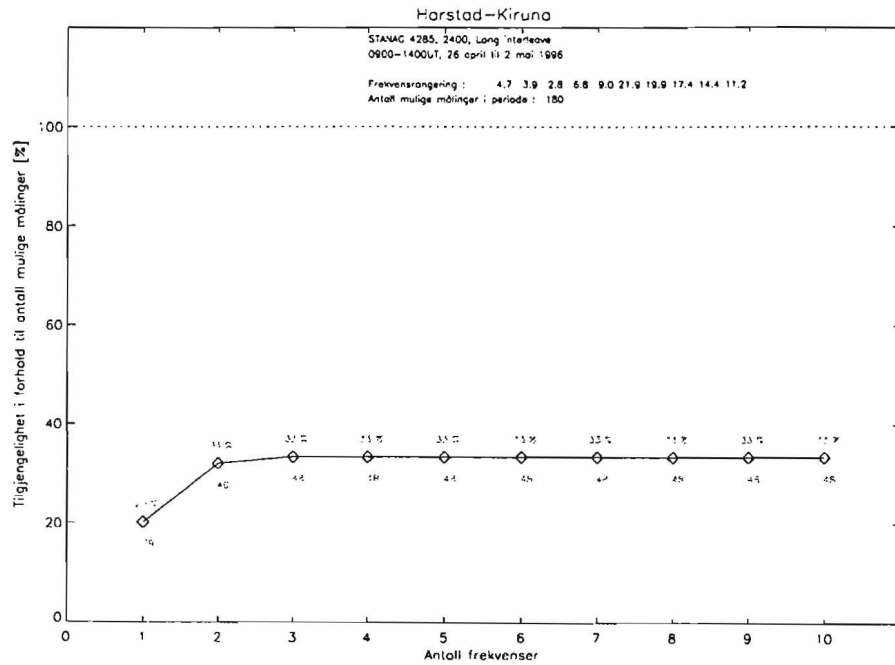
I dette kapitlet er det beregnet en flerfrekvenstilgjengelighet for STANAG 4415 (75 bps) og STANAG 4285 (2400 bps). I forhold til enkeltfrekvensanalysene vil disse resultatene vise en systemtilgjengelighet i forhold til et økende antall frekvenser. Dette er en tilgjengelighet som er sammenlignet med en kontinuerlig tidsperiode og ikke til et sett av målinger. I tillegg viser resultatene om frekvenser er tilgjengelige til forskjellig tid. Et slikt tilfelle oppstår hvis det blir en økning i tilgjengeligheten ved å bruke en ny frekvens i tillegg til de som allerede er brukt. Til slutt vil det være mulig å vurdere hvor mange frekvenser et HF-system bør bruke for å oppnå maksimal tilgjengelighet.

Dataserier og perioder på døgnet som er benyttet i denne analysen er de samme som for enkeltfrekvensanalyser. Bane- og parameterbeskrivelse er gitt i kapittel 7.

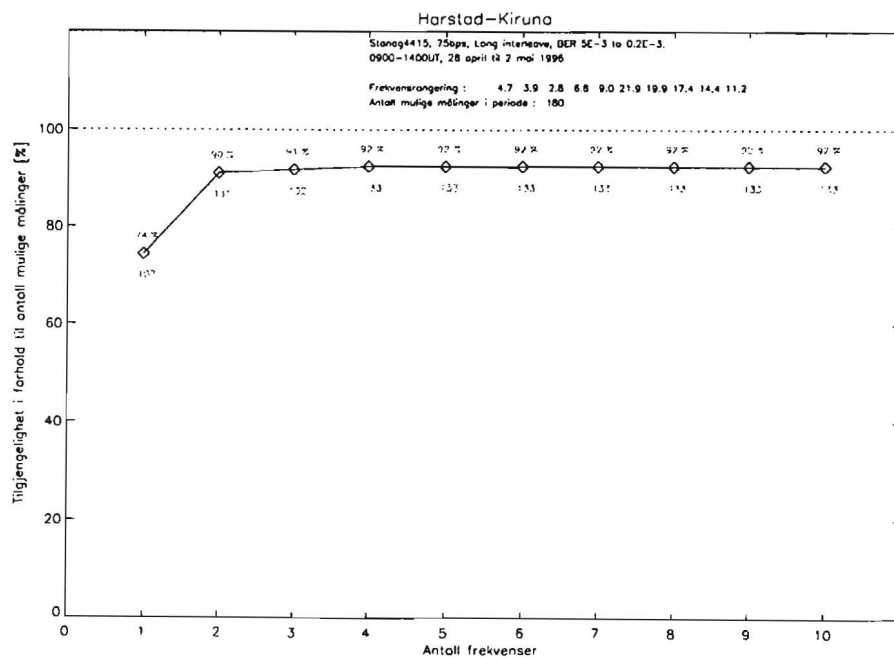
Resultatene for hver bane er gitt i hvert sitt underkapittel. Det er vist fire figurer som beskriver flerfrekvenstilgjengeligheten for den robuste og ikke-robuste bølgeformen på dag- og natterstid. Hver figur viser hvordan flerfrekvenstilgjengeligheten endres med et økende antall disponible frekvenser. Ved hver beregnet verdi er det vist den prosentvise flerfrekvenstilgjengeligheten og antallet godkjente punkter. I tolkningen av resultatene vil det ikke alltid bli oppgitt den absolutt maksimalt målte flerfrekvenstilgjengelighet og det tilhørende antallet frekvenser som det optimale punkt. I stedet velges det punkt hvor en videre økning i antall frekvenser gir en minimal økning i flerfrekvenstilgjengelighet. Hvis det ikke oppnås en økning i flerfrekvenstilgjengelighet som er 3 % eller bedre ved å bruke én ekstra frekvens, blir de allerede analyserte frekvenser tolket som det optimale antall for å oppnå maksimal flerfrekvenstilgjengelighet. Øverst i hver figur står det totale antall mulige målinger som kan utføres i døgnet valgte analyseintervall multiplisert med antallet dager i den kontinuerlige perioden. Frekvensrangeringen er vist øverst i hver figur.

9.1 Flerfrekvenstilgjengelighet på Harstad-Kiruna banen

På dagtid oppnår den ikke-robuste bølgeformen en maksimal flerfrekvenstilgjengelighet på 31 % (figur 9.1), mens den robuste oppnår en tilsvarende tilgjengelighet på 90 % (figur 9.2). Disse tilgjengelighetene oppnås ved å bruke de to antatt beste frekvensene.

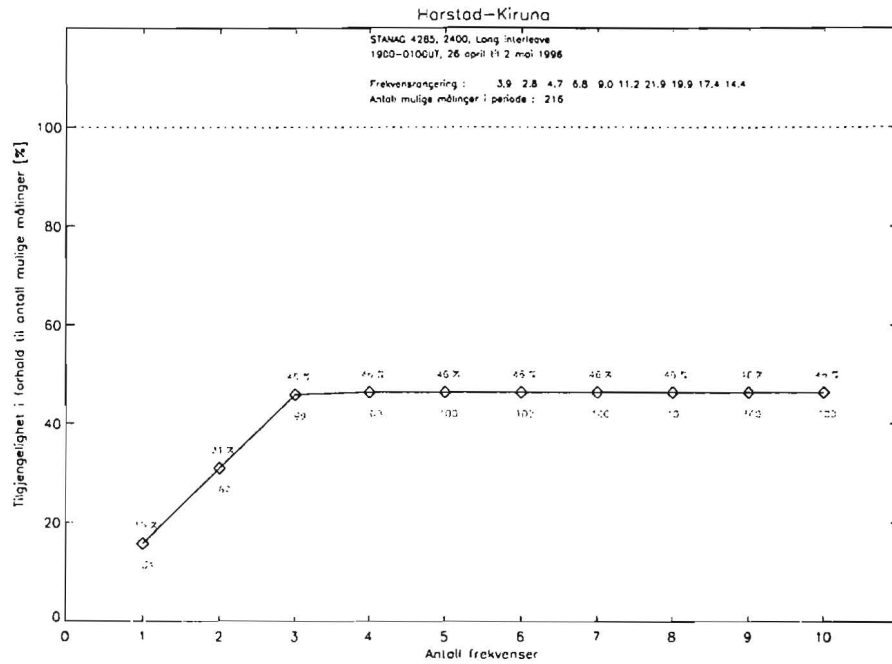


Figur 9.1 Flerfrekvenstilgjengelighet for STANAG 4285 (2400 bps) på dagtid.

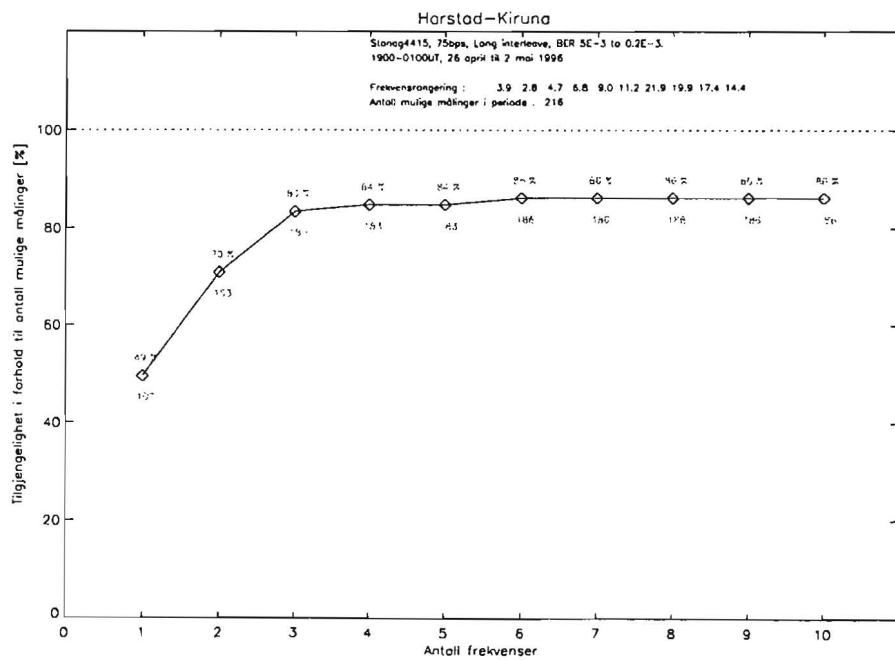


Figur 9.2 Flerfrekvenstilgjengelighet for STANAG 4415 (75 bps) på dagtid.

På natterstid oppnår den ikke-robuste bølgeformen en maksimal flerfrekvenstilgjengelighet på 45 % (figur 9.3), mens den robuste oppnår en tilsvarende tilgjengelighet på 83 % (figur 9.4). Disse tilgjengelighetene oppnås ved å bruke de tre antatt beste frekvensene.



Figur 9.3 Flerfrekvenstilgjengelighet for STANAG 4285 (2400 bps) på natterstid.



Figur 9.4 Flerfrekvenstilgjengelighet for STANAG 4415 (75 bps) på natterstid.

9.1.1 Diskusjon

Den robuste bølgeformen oppnår en klart bedre flerfrekvenstilgjengelighet i forhold til den ikke-robuste både på dag- og natterstid. Maksimal flerfrekvenstilgjengelighet for begge bølgeformene oppnås med de to og tre beste frekvensene på henholdsvis dag- og natterstid.

Enkeltfrekvensresultatene til den ikke-robuste bølgeformen i figur 7.4 viser på dagtid en tilgjengelighet på kun to frekvenser. De samme frekvensene ble også predikert av ICEPAC som de med størst pålitelighet. Flerfrekvensanalysen viser en markert økning i tilgjengelighet ved å bruke to i stedet for én frekvens. En ytterligere økning i antallet frekvenser som kan brukes øker ikke systemets tilgjengelighet. Dette viser at disse to frekvensene er tilgjengelige på delvis forskjellige tidspunkter og at de overlapper tilgjengeligheten til de resterende frekvensene. Det vil si at frekvensene er tilgjengelige i samme tidsluke.

På natterstid viser enkeltfrekvensresultatene i figur 7.6 tilgjengelighet på de tre laveste frekvensene. Disse frekvensene blir av ICEPAC predikert som de mest pålitelige. Også her viser flerfrekvensanalysen en markert økning i tilgjengelighet ved en økning fra én til tre frekvenser i rangert rekkefølge. En ytterligere økning i antallet frekvenser som kan brukes øker ikke systemets tilgjengelighet. Dette viser at de tre beste frekvensene er tilgjengelige på delvis forskjellige tidspunkter og at de overlapper tilgjengeligheten til de resterende frekvensene.

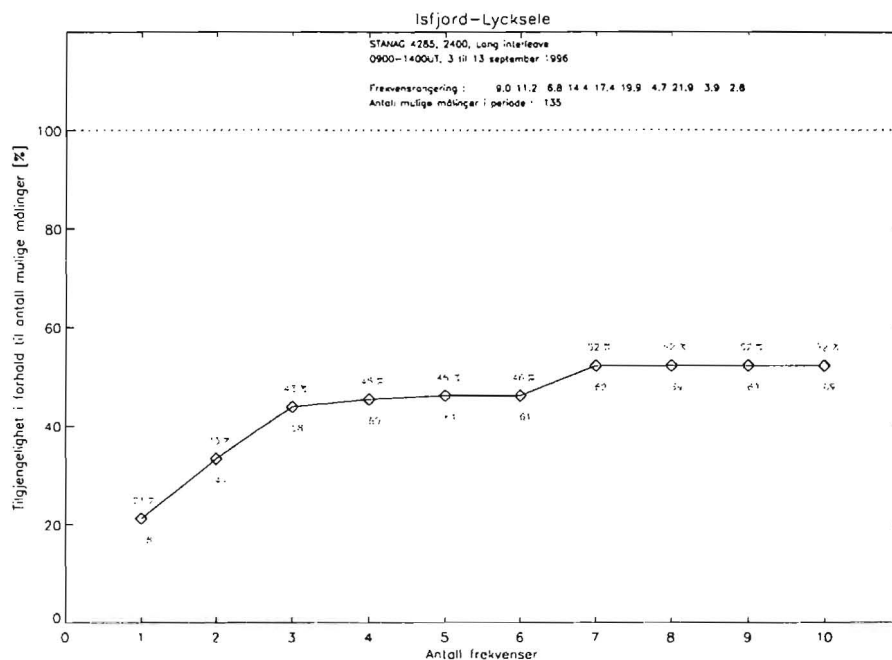
På dagtid viste enkeltfrekvensresultatene for den robuste bølgeformen i figur 7.5 at 6 frekvenser oppnår en tilgjengelighet som overstiger 50 %. ICEPAC predikterer de tre laveste frekvensene som de mest pålitelige. Flerfrekvensanalysen viser en markert økning i tilgjengelighet ved å bruke to i stedet for én frekvens, men en ytterligere økning i antall frekvenser øker ikke flerfrekvenstilgjengeligheten. De andre frekvensene med høy tilgjengelighet må da overlape i tid.

På natterstid viste enkeltfrekvensanalysen i figur 7.7 for den robuste bølgeformen at 5 frekvenser oppnår en tilgjengelighet som overstiger 60 %. ICEPAC predikterer de tre laveste frekvensene som de mest pålitelige. Flerfrekvensanalysen viser en markert økning i tilgjengelighet ved en økning fra én til tre frekvenser i rangert rekkefølge, som altså viser at også den tredje laveste frekvensen er tilgjengelig på tidspunkt da de to andre frekvensene ikke er det.

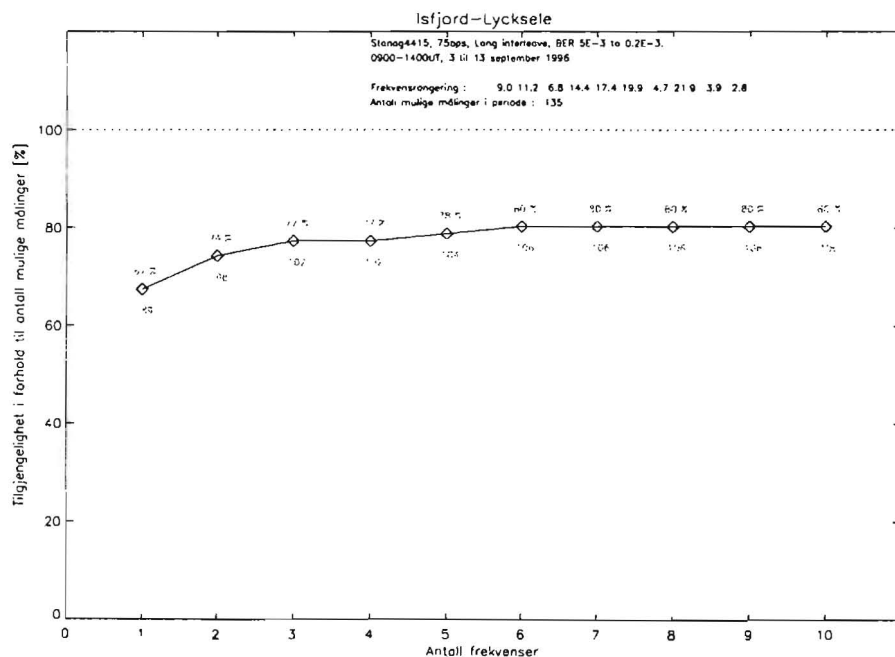
For et HF-flerfrekvenssystem som skal operere på denne banen og som skal oppnå maksimal tilgjengelighet, vil dette oppnås ved å bruke de to antatt beste frekvensene på dagtid og de tre antatt beste frekvensene på natterstid for begge bølgeformene. For denne banen, dette tidsrommet og ionosfæreforhold gir ICEPAC en korrekt frekvensrangering.

9.2 Flerfrekvenstilgjengelighet på Isfjord-Lycksäle banen

På dagtid oppnår den ikke-robuste bølgeformen en maksimal flerfrekvenstilgjengelighet på 52 % (figur 9.5) ved å bruke 7 frekvenser. Den robuste bølgeformen oppnår en tilgjengelighet på 77 % (figur 9.6) ved å bruke 3 frekvenser.

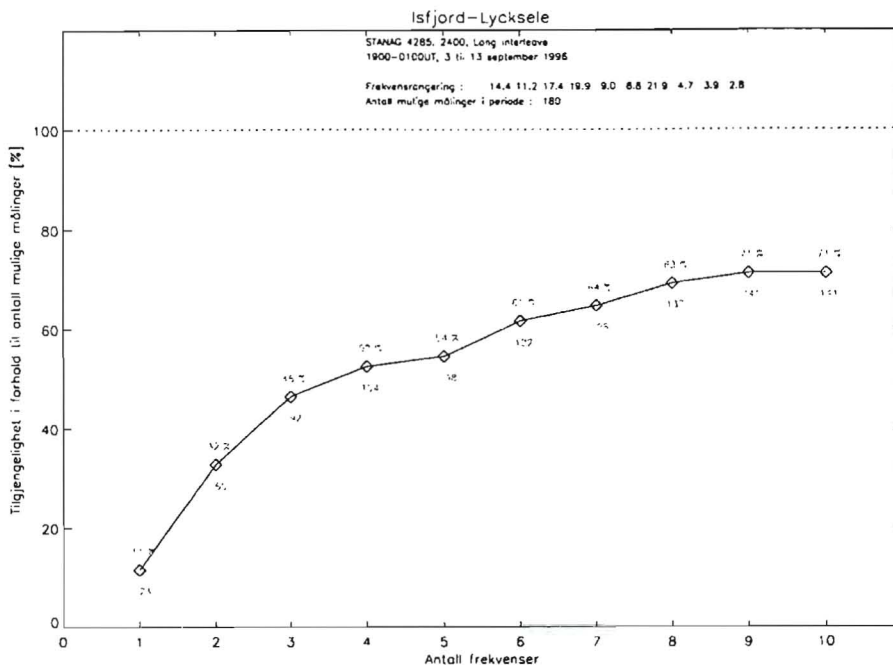


Figur 9.5 Flerfrekvenstilgjengelighet for STANAG 4285 (2400 bps) på dagtid.

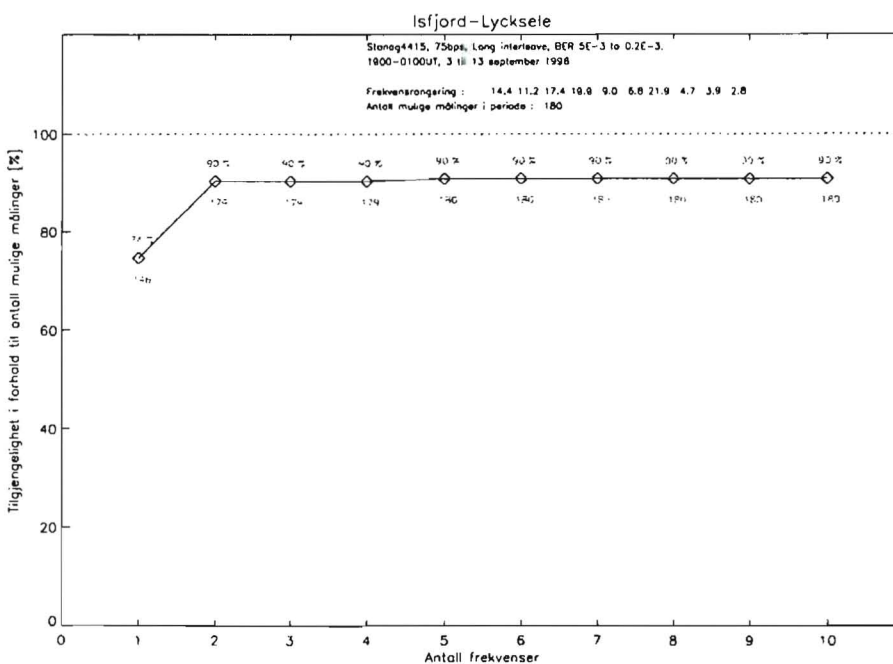


Figur 9.6 Flerfrekvenstilgjengelighet for STANAG 4415 (75 bps) på dagtid.

På natterstid oppnår den ikke-robuste bølgeformen en maksimal tilgjengelighet på 69 % ved å bruke 8 av 10 mulige frekvenser (figur 9.7). Den robuste bølgeformen oppnår en maksimal tilgjengelighet på 90 % ved å bruke 2 av de antatt beste frekvensene (figur 9.8).



Figur 9.7 Flerfrekvenstilgjengelighet for STANAG 4285 (2400 bps) på natterstid.



Figur 9.8 Flerfrekvenstilgjengelighet for STANAG 4415 (75 bps) på natterstid.

9.2.1 Diskusjon

Den robuste bølgeformen oppnår en klart bedre flerfrekvenstilgjengelighet i forhold til den ikke-robuste både på dag- og nattertid.

Flerfrekvensresultatene på dagtid for den ikke-robuste bølgeformen viser at frekvensrangeringen gitt av ICEPAC ikke er helt korrekt i forhold til dette modemmet. En korrekt frekvensrangering er synlig ved at tilgjengelighetskurven har et avtagende stigningstall mot maksimal tilgjengelighet. I forhold til den robuste bølgeformen er den ikke-robuste mer følsom for feilrangeringer. Årsaken til dette er at den robuste bølgeformen oppnår en svært god tilgjengelighet i et større frekvensområde enn den ikke-robuste bølgeformen, se figur 7.16. På dagtid ville den ikke-robuste bølgeformen med en bedre rangering muligens oppnå maksimal tilgjengelighet med 4 i stedet for 7 frekvenser.

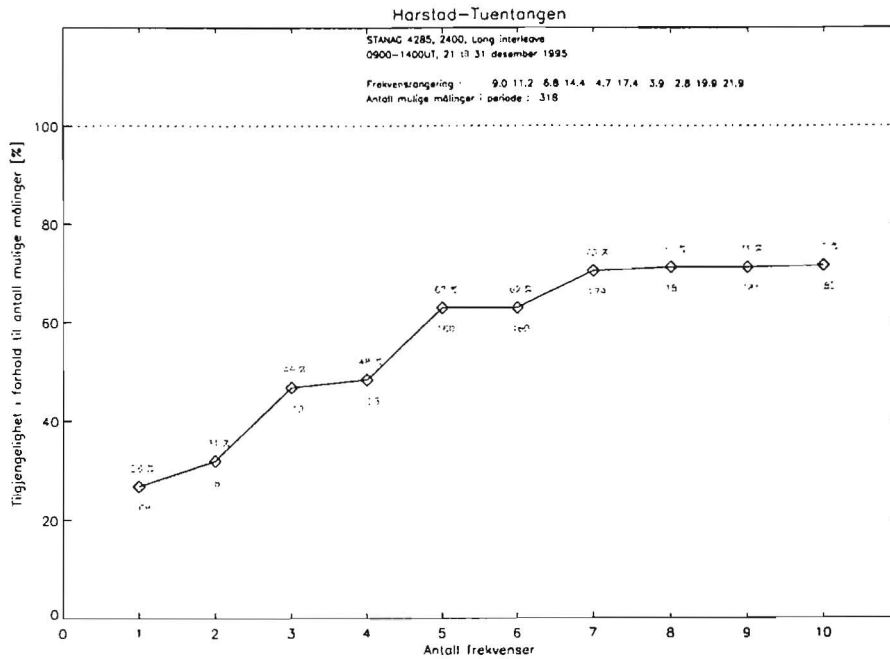
På nattertid oppnår den robuste bølgeformen en enkeltfrekvenstilgjengelighet på over 60 % på alle frekvenser, se figur 7.16. Maksimal flerfrekvenstilgjengelighet oppnås etter 2 frekvenser. Dette betyr at de fleste frekvensene overlapper i tilgjengelighet.

Den ikke-robuste bølgeformen oppnår om natten en jevn økning i flerfrekvenstilgjengeligheten med et økende antall disponible frekvenser inntil maksimal tilgjengelighet på den 9. frekvensen. I forhold til enkeltfrekvensresultatene for den ikke-robuste bølgeformen i figur 7.15 er ikke frekvensrangeringen helt korrekt. Hvis rangeringen hadde stemt med tilgjengeligheten til hver frekvens, ville det vært mulig å oppnå maksimal tilgjengelighet med 2-3 færre frekvenser.

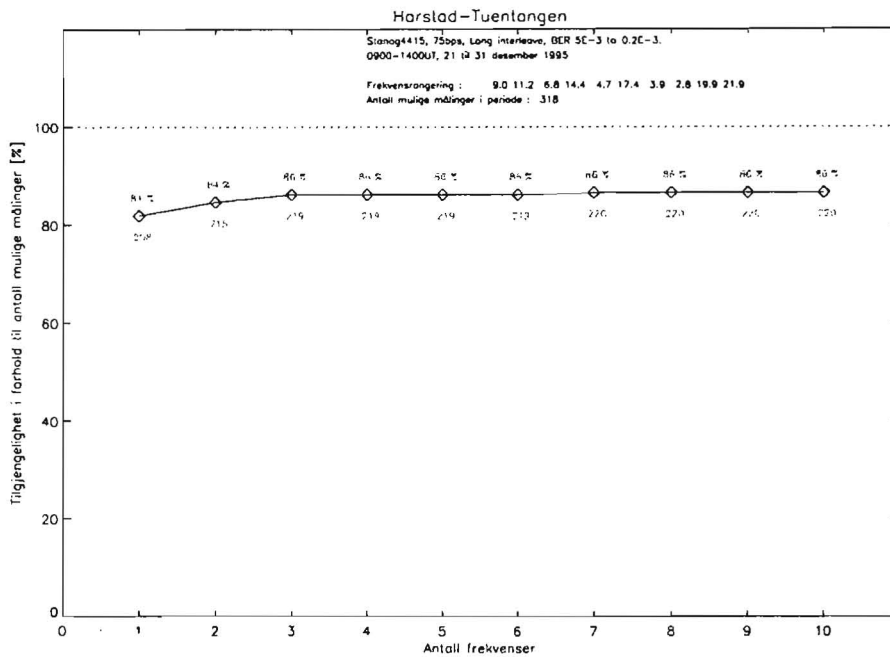
Et HF-flerfrekvenssystem kan på denne banen oppnå maksimal flerfrekvenstilgjengelighet med 3 frekvenser på dagtid og 2 frekvenser på nattertid for den robuste bølgeformen. Maksimal flerfrekvenstilgjengelighet for den ikke-robuste bølgeformen oppnås med 7 frekvenser på dagtid og 8 frekvenser på nattertid. ICEPAC prediksjonene fører ikke til en helt korrekt frekvensrangering, men foretar et riktig valg for de beste frekvensene.

9.3 Flerfrekvenstilgjengelighet på Harstad–Tuentangen banen

På dagtid oppnår den ikke-robuste bølgeformen en maksimal flerfrekvenstilgjengelighet på 70 % ved å bruke de 7 antatt beste frekvensene. For det samme tidsrommet oppnår den robuste bølgeformen en maksimal flerfrekvenstilgjengelighet på 84 % ved å bruke de 2 antatt beste frekvensene.

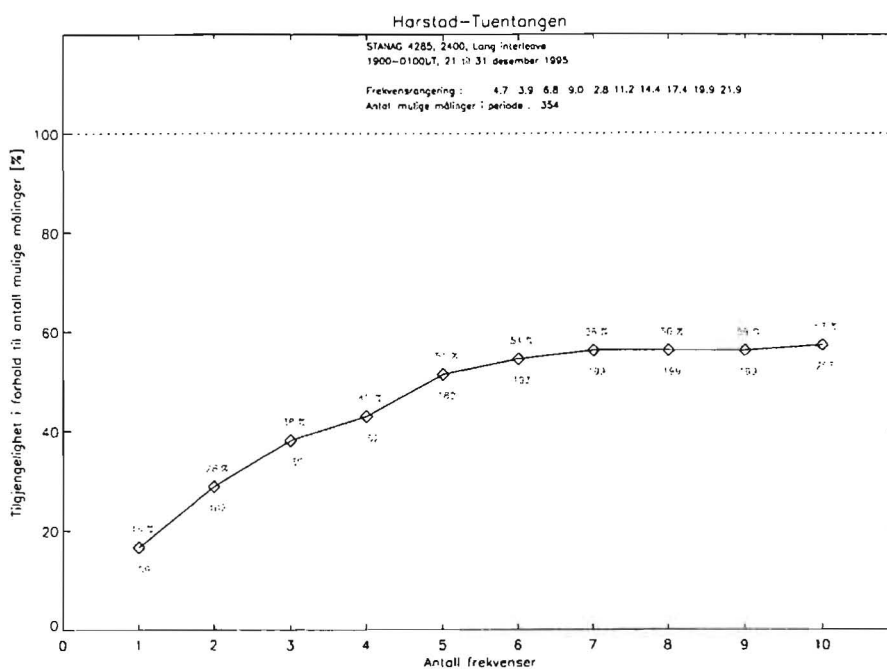


Figur 9.9 Flerfrekvenstilgjengelighet for STANAG 4285 (2400 bps) på dagtid.

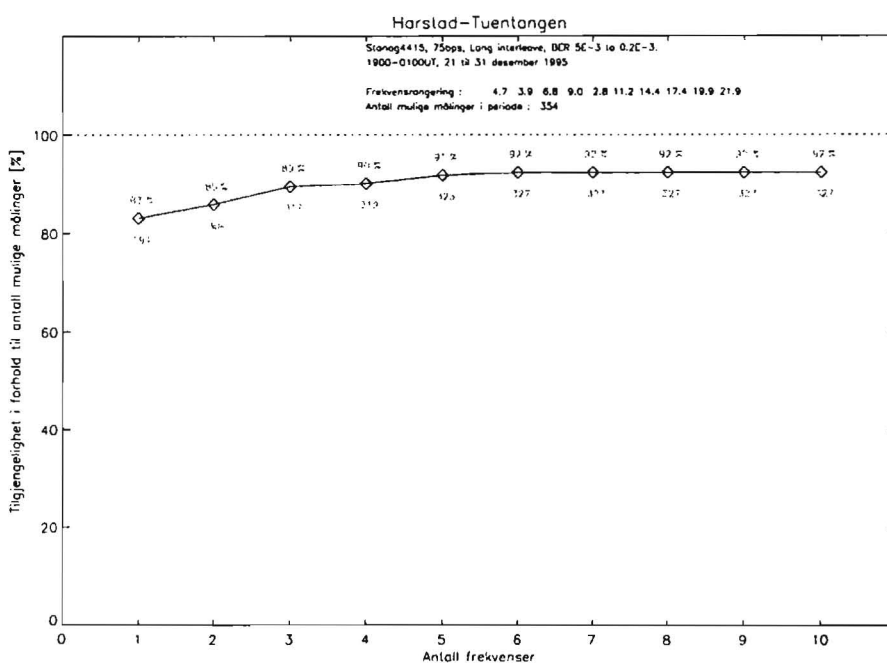


Figur 9.10 Flerfrekvenstilgjengelighet for STANAG 4415 (75 bps) på dagtid.

På natterstid oppnår den ikke-robuste bølgeformen en maksimal flerfrekvenstilgjengelighet på 54 % ved å bruke 6 frekvenser. I det samme tidsrommet oppnår den robuste bølgeformen en maksimal flerfrekvenstilgjengelighet på 89 % ved å bruke de 3 antatt beste frekvensene.



Figur 9.11 Flerfrekvenstilgjengelighet for STANAG 4285 (2400 bps) på natterstid.



Figur 9.12 Flerfrekvenstilgjengelighet for STANAG 4415 (75 bps) på natterstid.

9.3.1 Diskusjon

Den robuste bølgeformen oppnår en høyere flerfrekvenstilgjengelighet enn den ikke-robuste med færre disponible frekvenser.

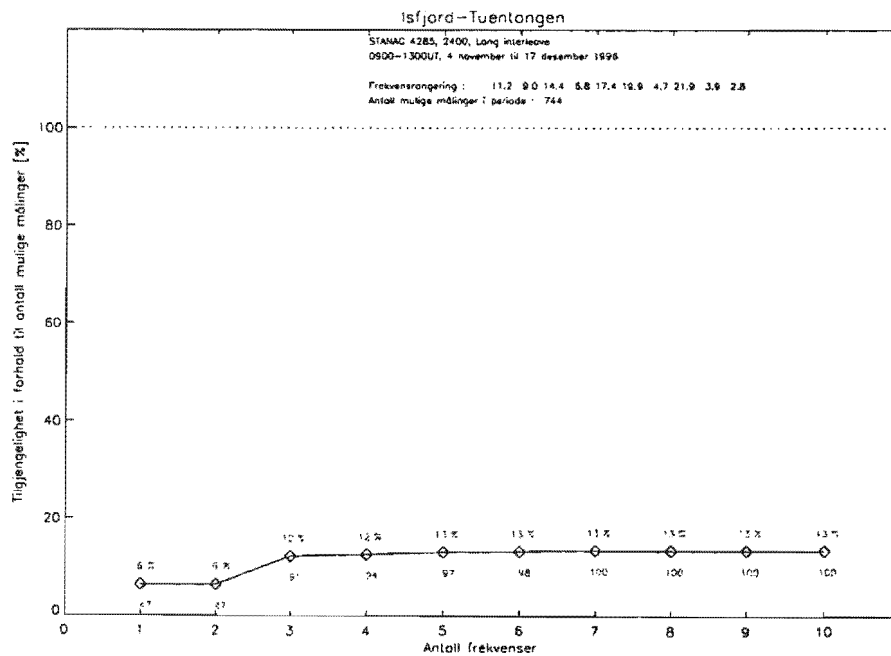
ICEPAC prediksjonene på dagtid stemmer ikke helt med enkeltfrekvensresultatene i kapittel 7.3. Dette kan sees ved at flerfrekvenstilgjengeligheten til den ikke-robuste bølgeformen i figur 9.9 viser en ujevn stigning mot maksimal tilgjengelighet. Maksimal flerfrekvenstilgjengelighet på 70 % oppnås med 7 frekvenser for denne bølgeformen. En bedre rangering ville redusere dette antallet noe. Den robuste bølgeformen oppnår en svært god flerfrekvenstilgjengelighet på 84 % med 2 frekvenser. En viktig observasjon er at flerfrekvenstilgjengeligheten for den robuste bølgeformen påvirkes lite av feilrangering.

Om natten er ICEPAC prediksjonene korrekte i forhold til enkeltfrekvensresultatene vist i figur 7.24 for den ikke-robuste bølgeformen. Maksimal flerfrekvenstilgjengelighet på 54 % oppnås med 6 frekvenser. Den robuste bølgeformen viser den samme gode ytelse som på dagtid, og maksimal flerfrekvenstilgjengelighet på 89 % oppnås med å bruke 3 frekvenser.

På grunn av feilrangeringen utført av ICEPAC i forhold til dette modemet, vil systemet bruke flere frekvenser enn nødvendig for å oppnå maksimal flerfrekvenstilgjengelighet dersom ICEPAC prediksjonene følges. Om natten er ICEPAC prediksjonene korrekte. Den robuste bølgeformen påvirkes ikke av rangeringen på dagtid og oppnår en svært god flerfrekvenstilgjengelighet med et lite antall frekvenser. ICEPAC vil generelt sett utføre gode prediksjoner på denne banen og kan brukes til frekvensrangering.

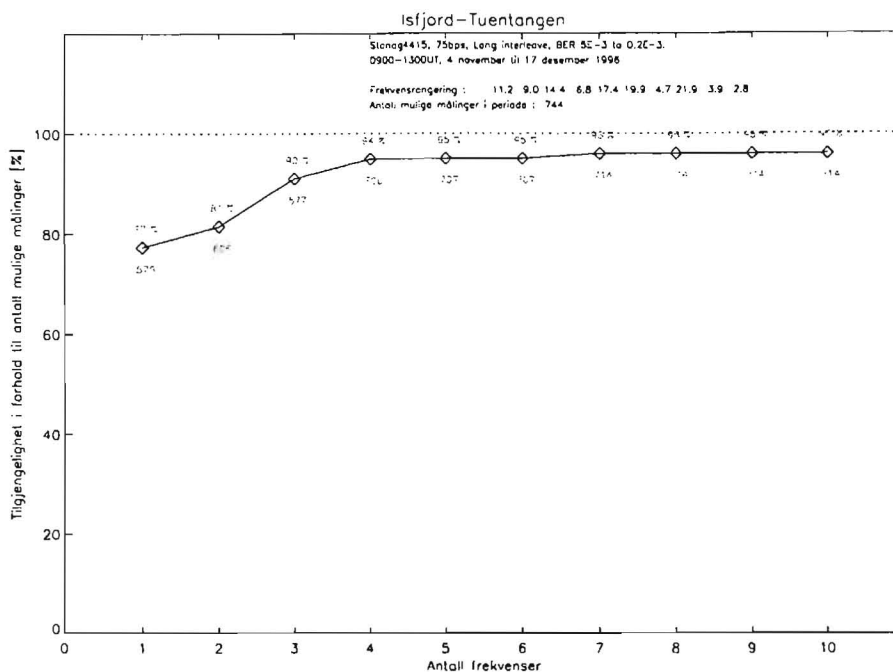
9.4 Flerfrekvenstilgjengelighet på Isfjord–Tuentangen banen

På dagtid oppnår den ikke-robuste bølgeformen en maksimal flerfrekvenstilgjengelighet på 12 % ved å bruke de 3 antatt beste frekvensene.



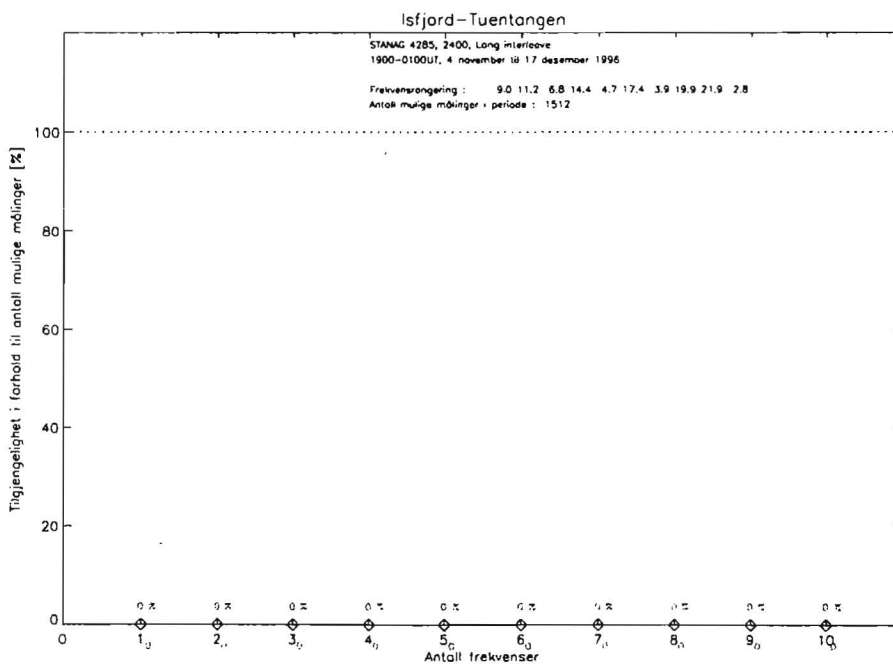
Figur 9.13 Flerfrekvenstilgjengelighet for STANAG 4285 (2400 bps) på dagtid.

I det samme tidsrommet oppnår den robuste bølgeformen en tilgjengelighet på 94 % ved å bruke de 4 antatt beste frekvensene.

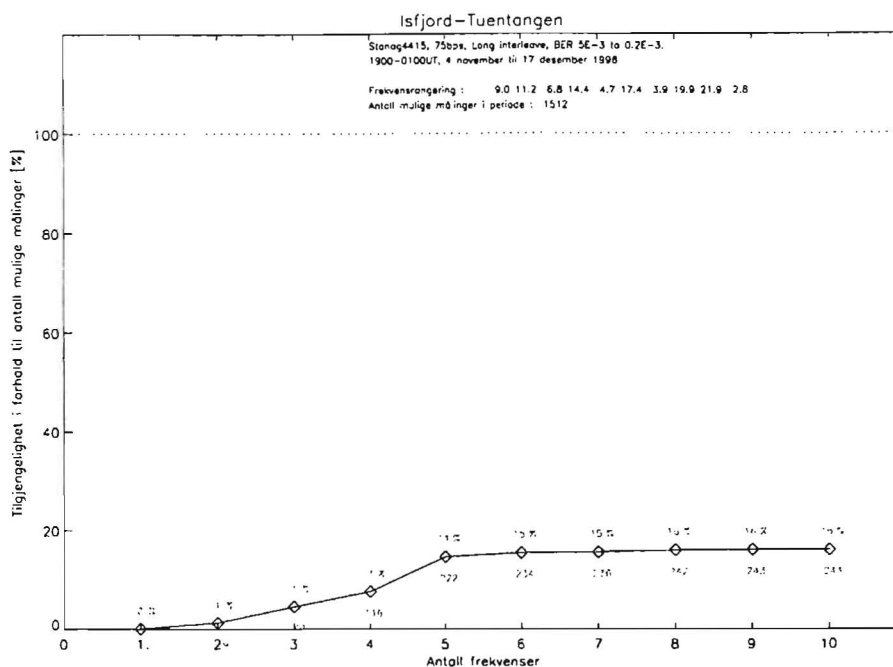


Figur 9.14 Flerfrekvenstilgjengelighet for STANAG 4415 (75 bps) på dagtid.

På natterstid er kanalforholdene så dårlige at den ikke-robuste bølgeformen ikke oppnår noen flerfrekvenstilgjengelighet. Den robuste bølgeformen oppnår en maksimal flerfrekvenstilgjengelighet på 14 % i det samme tidsrommet ved å bruke 5 frekvenser.



Figur 9.15 Flerfrekvenstilgjengelighet for STANAG 4285 (2400 bps) på natterstid.



Figur 9.16 Flerfrekvenstilgjengelighet for STANAG 4415 (75 bps) på nattertid.

9.4.1 Diskusjon

Som beskrevet i kapittel 7.4 inneholder denne dataserien dårlige signal til støy forhold på grunn av antennebrudd. Under disse forholdene er ytelsen til den robuste bølgeformen svært god i forhold til den ikke-robuste.

På dagtid er de fire best rangerte frekvensene i følge ICEPAC prediksjon frekvensene 4.7, 6.8, 9.0, 11.2 og 14.4 MHz, se figur 7.32. Dette er også de frekvensene under MUF som oppnår best tilgjengelighet. Frekvensene 17.4 og 19.9 MHz viser en god tilgjengelighet i samme figur, men på et lite datagrunnlag og blir av denne grunn utelukket som gode frekvenser.

SNR målingene i denne dagsperioden er lave (gjennomsnitt < 0 dB for alle frekvenser). Likevel oppnår den robuste bølgeformen en svært god flerfrekvensytelse på 94 % ved å bruke de 4 best rangerte frekvensene. Den ikke-robuste bølgeformen oppnår en flerfrekvenstilgjengelighet på 12 % med de 3 best rangerte frekvensene. På dagtid viser STANAG 4415 (75 bps) sin overlegne ytelse i forhold til STANAG 4285 (2400 bps) under dårlige kanalforhold.

Om natten er kanalforholdene så dårlige at det ikke oppnås noen tilgjengelighet med den ikke-robuste bølgeformen. Den robuste bølgeformen oppnår en flerfrekvenstilgjengelighet på 14 % ved å bruke de 5 best rangerte frekvensene. Maksimal tilgjengelighet kunne med en bedre frekvensrangering blitt oppnådd med færre frekvenser.

Med de regjerende kanalforhold på denne banen i denne perioden, ville et HF-flerfrekvenssystem oppnå maksimal flerfrekvenstilgjengelighet med fire frekvenser på dagtid og fem om nattertid. Selv om ICEPAC ikke predikterer helt optimal rangering, vil den likevel danne et godt utgangspunkt for frekvensvalg.

10 OPPSUMMERING OG KONKLUSJON

Alle resultater er presentert og diskutert i kapittel 7 og 9. Tabell 10.1 og 10.2 oppsummerer viktige enkeltfrekvensresultater for DAMSON banene. For hver bane, tidsperiode og modem er det gitt den absolutt maksimale enkeltfrekvenstilgjengelighet som ble oppnådd med en av DAMSON frekvensene. Det er også vist antallet frekvenser som oppnådde en tilgjengelighet som var større enn halvparten av den absolutt maksimale tilgjengelighet. Analyseperiodene er fra flere årstider. Sammenligningen av det robuste (STANAG 4415, 75 bps) og det ikke-robuste modemmet (STANAG 4285, 2400 bps) er ikke utført for å vise hvilket som er best, men for å demonstrere forskjellen på to så ulike modemer på en viss type kanal.

		H-K	H-T	I-L	I-T	
Dag	4285	Maks. %	25	35	12	25
	4415	Maks. %	100	99	75	96
	4285	Ant. > ½ maks.	2	1	2	5
	4415	Ant. > ½ maks.	5	6	5	6

Tabell 10.1 Maksimale enkeltfrekvensresultater og antallet frekvenser med en tilgjengelighet som er større enn den absolutte halve maksimale tilgjengelighet. Alle baner, dagtid.

		H-K	H-T	I-L	I-T	
Natt	4285	Maks. %	37	18	6	24
	4415	Maks. %	100	94	19	99
	4285	Ant. > ½ maks.	3	6	1	5
	4415	Ant. > ½ maks.	7	10	2	10

Tabell 10.2 Maksimale enkeltfrekvensresultater og antallet frekvenser med en tilgjengelighet som er større enn den absolutte halve maksimale tilgjengelighet. Alle baner, natterstid.

Tabell 10.3 og 10.4 oppsummerer resultatene for flerfrekvensanalysen på hver DAMSON bane. Den maksimale flerfrekvenstilgjengelighet er den optimale, ikke den absolutte. Antallet frekvenser er det antallet som gir den optimale tilgjengelighet.

		H-K	H-T	I-L	I-T	
Dag	4285	Maks. %	31	70	52	12
	4415	Maks. %	90	84	77	94
	4285	Ant. frek.	2	7	7	3
	4415	Ant. frek.	2	2	3	4

Tabell 10.3 Optimal flerfrekvenstilgjengelighet og det optimale antall frekvenser. Alle baner, dagtid.

		H-K	H-T	I-L	I-T	
Natt	4285	Maks. %	45	54	69	0
	4415	Maks. %	83	89	90	14
	4285	Ant. frek.	3	6	8	0
	4415	Ant. frek.	3	3	2	5

Tabell 10.4 Optimal flerfrekvenstilgjengelighet og det optimale antall frekvenser. Alle baner, natterstid.

På grunnlag av analyseresultatene fra disse banene og årstider kan følgende konklusjoner trekkes:

- Enkeltfrekvenstilgjengeligheten for det robuste modemmet er 50 til 70 % høyere enn for det ikke-robuste modemmet på dag- og natterstid.
- I de tilfellene modemene feiler, er svakt signal til støy forhold den viktigste årsak. Tids- og frekvensspredning er ingen årsak til at det robuste modemmet feiler, men de er ofte årsak til at det ikke-robuste modemmet feiler. På Harstad-Kiruna banen som er en kort bane i vest-øst retning, er stor tidsspredning en viktig feilende årsak på dagtid, mens stor frekvensspredning er en viktig årsak om natten.
- Frekvensrangeringen basert på ICEPAC prediktert pålitelighet til hver DAMSON frekvens stemmer godt overens med DAMSON målingene.
- I et flerfrekvenssystem oppnår den robuste bølgeformen en høyere maksimal flerfrekvenstilgjengelighet enn den ikke-robuste bølgeformen. Maksimal tilgjengelighet oppnås med 2-5 frekvenser for den robuste bølgeformen og med 3-8 frekvenser for den ikke-robuste bølgeformen. Her er det et unntak for Harstad-Kiruna banen hvor maksimal flerfrekvenstilgjengelighet oppnås med 2-3 frekvenser for begge bølgeformene.
- Det er ingen stor forskjell på det minimale antall frekvenser som behøves for å oppnå maksimal flerfrekvenstilgjengelighet på dag- og natterstid.

Litteratur

- (1) Goodman J.M (1992): HF communications science and technology., *Van Nostrand Reinhold*, New York.
- (2) Soicher H (1988): Media effects on electronic systems in the high latitude region. *AGARD-LS-162*, pp 1/1-3 .
- (3) Space Environment Centre, USA (1998): Auroral activity extrapolated from NOAA/POES, <http://www.sec.noaa.gov/pmap/>.
- (4) Rush C.M (1986): Ionospheric radio propagation models and predictions - A mini review, *IEE Transactions on antennas and propagation AP-34*, 9, 1163-1170.
- (5) Stewart F., Hand G: Ionospheric Communications Enhanced Profile Analysis and Circuit prediction program, ICEPAC, Institute of Telecommunications Sciences, Boulder, Colorado USA (private communication).
- (6) Tascione T.F., K.W Kroehl and B.A. Hausman (1987): A technical description of the ionospheric conductivity and electron density profile model (ICED, version 196-II), *Syst. Doc Vol. VII, Air Weather Serv., U.S. Air Force, Scott Air Force Base, III*.
- (7) Davies N.C., P.S. Cannon (1993): DAMSON-A system to measure multipath dispersion, doppler spread and doppler shift on multi-mechanism communications channels, *Proceedings of AGARD Symp. On multiple mechanism propagation paths (MMPS): Their characterisation and influence on system design*, CP-543, Rotterdam.
- (8) Bröms M., B. Lundborg, V. Jodalen and T. Bergsvik (1997): Doppler effects on high latitude HF paths during an ionospheric disturbance, *IEE HF radio systems and techniques*, Conference publication, No. 411, pp 75-79.
- (9) Angling M.J. and N.C. Davies (1998): On an ionospheric channel simulator driven by measurements of multipath and doppler spread, *Nordic shortwave conference (HF 98)*, Fårö, Sweden, 11-13 august 1998.
- (10) Angling M.J: Description and user guide for the DAMSON analysis software; version 7.0.
- (11) Haykin S (1994): Communication systems (third edition), *Wiley and sons*, New York.
- (12) MIL-STD-188-110A: Interoperability and performance standards for data modems (1991): *Department and Agencies of Defence (DOD)*.
- (13) STANAG 4285: Characteristics of 1200/2400/3600 bits per second single tone modulators/demodulators for HF radio links (1989): *North Atlantic Treaty Organization (NATO), Military Agency for Standardization (MAS)*.
- (14) Cook S.C (1995): Advances in high-speed HF radio modem design, *Nordic Shortwave conference (HF 95)*, Fårö, Sweden, 15-17 august 1995.

- (15) Clark D.A., D.E Freberg and H. van 't Hoog (1993): BRASS broadcast: modem waveform study, *Shape Technical Centre (STC)*, technical note 468.
- (16) Arthur P.C. and M.J Maundrell (1997): Multi-dimensional HF modem performance characterisation, *IEE 7 international conference, 'HF radio systems and techniques'*, conference publication No. 441, pp 154-158.
- (17) Watterson C.C., J.R Juroshek and W.D Bensema (1970): Experimental confirmation of an HF channel model, *IEEE transactions on communication technology*, **COM-18**, 6, 792-803.
- (18) Bergzén H (1994): System architecture of an HF multi-station node controller, *Sixth international conference on 'HF radio systems and techniques'*, No. 392, pp 315-319.
- (19) Arthur P.C and M.J. Maundrell (1996): The concept of operation for an automatic radio control system, *IEE Colloquium on Frequency selection and management techniques for HF communications*, 1996/024.
- (20) Willink T.J and W.N Furman (1996): On fast automatic link establishment, *IEE Colloquium on Frequency selection and management techniques for HF communications*, 1996/024.
- (21) Willink T.J and E. C Landry (1997): Analysis of time-varying HF propagation characteristics, *IEE 7 international conference, 'HF radio systems and techniques'*, conference publication 441, pp 70-74.
- (22) Teters L.R., J.L Lloyd, G.W Haydon, D.L Lucas(1983): Estimating the performance of telecommunication systems using the ionospheric transmission channel, *NTIA Rep., 83-127, National Telecommunications and Information Administration, Boulder, Colorado*.
- (23) Angling M.J., P.S Cannon, N.C Davies, T.J Willink, V Jodalen and B Lundborg (1998): Measurements of Doppler and multipath spread on oblique high-latitude HF paths and their use in characterizing data modem performance, *Radio Science* **33**, 1, 97-107.
- (24) Jodalen V and T Bergsvik (1998): The high latitude performance and availabilities of robust and non-robust modems using multiple frequencies, *Nordic shortwave conference (HF 98)*, Fårö, Sweden, 11-13 august 1998.

APPENDIKS

A EKSEMPEL PÅ PREDIKSJON UTFØRT MED ICEPAC

Når vi rangerer frekvensene basert på ICEPAC prediksjon, velges den midterste time i en valgt analyseperiode, for eksempel i dagperioden (09-13 UT) velges time 10 eller 11 UT. Her har vi valgt 10 UT (rad med uthevet skrift). Frekvensene rangeres for denne timen. I dette tilfellet velges enten 9.0 eller 11.2 MHz som den beste frekvens.

URSI Coefficients METHOD 24 ICEPAC Version 9801W32 PAGE 1

SEP 1996 SSN = 0. Qeff= 3.0 Minimum Angle 0.10 deg
 Isfjord, Svalbard Lycksele, Sweden AZIMUTHS N. MI. KM
 78.03 N 13.47 E - 64.36 N 18.40 E 171.00 355.70 825.5 1528.7
 XMTR 2-30 IONCAP #29[SAMPLES\SAMPLE.29] Az=171.0 OFFaz=360.0 200.000kW
 RCVR 2-30 IONCAP #23[SAMPLES\SAMPLE.23] Az=355.7 OFFaz=360.0
 3 MHZ NOISE = -145.0 DBW REQ. REL = .90 REQ. SNR = 55.0 DB

FREQUENCY / RELIABILITY

UT	MUF	2.8	4.0	4.7	6.8	9.0	11.2	14.4	17.5	20.0	21.9	-	MUF
1	10.8	0.75	0.84	0.86	0.88	0.96	0.95	0.74	0.10	0.00	0.00	-	0.96
2	11.0	0.00	0.03	0.54	0.78	0.92	0.93	0.72	0.09	0.00	0.00	-	0.95
3	11.2	0.00	0.12	0.55	0.79	0.88	0.90	0.68	0.08	0.00	0.00	-	0.90
4	7.8	0.64	0.80	0.84	0.91	0.87	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.92
5	8.7	0.52	0.72	0.80	0.88	0.90	0.70	0.02	0.00	0.00	0.00	-	0.91
6	10.0	0.11	0.43	0.53	0.71	0.80	0.71	0.15	0.00	0.00	0.00	-	0.81
7	10.9	0.04	0.35	0.47	0.69	0.78	0.77	0.40	0.01	0.00	0.00	-	0.81
8	10.4	0.00	0.04	0.29	0.76	0.84	0.79	0.35	0.00	0.00	0.00	-	0.81
9	10.9	0.00	0.02	0.24	0.74	0.94	0.93	0.66	0.04	0.00	0.00	-	0.94
10	11.2	0.00	0.02	0.35	0.75	0.94	0.94	0.72	0.07	0.00	0.00	-	0.94
11	11.4	0.00	0.02	0.35	0.75	0.94	0.94	0.75	0.09	0.00	0.00	-	0.93
12	11.5	0.00	0.02	0.46	0.82	0.98	0.96	0.81	0.14	0.00	0.00	-	0.96
13	11.3	0.00	0.16	0.46	0.84	0.99	0.97	0.83	0.24	0.01	0.00	-	0.97
14	12.2	0.03	0.74	0.88	0.98	0.99	0.98	0.89	0.46	0.04	0.00	-	0.96
15	11.4	0.12	0.73	0.82	0.94	0.96	0.95	0.82	0.24	0.01	0.00	-	0.95
16	11.0	0.47	0.79	0.89	0.95	0.96	0.95	0.77	0.21	0.01	0.00	-	0.95
17	10.1	0.60	0.84	0.88	0.94	0.95	0.95	0.86	0.51	0.12	0.01	-	0.97
18	12.0	0.37	0.70	0.77	0.88	0.93	0.96	0.92	0.77	0.45	0.16	-	0.95
19	11.7	0.24	0.60	0.71	0.86	0.92	0.95	0.91	0.74	0.41	0.14	-	0.96
20	12.6	0.64	0.74	0.80	0.90	0.93	0.95	0.93	0.82	0.57	0.28	-	0.94

21	11.9	0.67	0.80	0.86	0.89	0.95	0.94	0.87	0.67	0.36	0.14	-	0.94
22	11.7	0.67	0.80	0.86	0.90	0.95	0.93	0.86	0.63	0.30	0.08	-	0.92
23	11.6	0.67	0.80	0.86	0.90	0.95	0.94	0.85	0.59	0.21	0.03	-	0.93
24	11.4	0.77	0.84	0.87	0.91	0.96	0.96	0.58	0.35	0.03	0.00	-	0.87

B DEFINISJONER OG FORKORTELSER

ACS	Automatic Channel Selection
ALE	Automatic Link Establishment
ALM	Automatic Link Maintenance
ARCS	Automatic Radio Control System
BER	Bit Error Rate
BLOS	Beyond Line Of Sight
CRC	Communications Research Centre, Ottawa, Canada
CW	Continous Wave
DAMSON	Doppler And Multipath SOunding Network
DD	Doppler Delay
DERA	Defence Evaluation and Research Agency
DS	Dopplerspredning (frekvensspredning)
FFI	Forsvarets forskningsinstitut
FOA	Försvarets forskningsanstalt, Sverige
GPS	Global Positioning System
HF	High Frequency
ICED	Ionospheric Conductivity and Electron Density profile model
ICEPAC	Ionospheric Communications Enhanced Profile Analysis and Circuit Prediction Program
IONCAP	IONospheric Communications Analysis and Prediction program Prediction Program (IONCAP)
ISI	Inter Symbol Interference
LUF	Lowest Useable Frequency

MIL-STD	Military standard (amerikansk)
Modem	MOdulator/DEModulator
MUF	Maximum Usable Frequency
NATO	North Atlantic Treaty Organisation
NOAA/POES	National Oceanic and Atmospheric Administration/Polar Operational Environment Satellites
NVIS	Near Vertical Incident Skywave
PSK	Phase Shift Keying
RTCE	Real Time Channel Evaluation
SNR	Signal to noise ratio
STANAG	STANdardisation AGreement in NATO
STC	Shape Technical Centre
TOF	Time Of Flight
Tx / Rx	Transmitter/Receiver

C ARTIKKEL AKSEPTERT TIL NORDISK HF KONFERANSE 1998**THE HIGH LATITUDE PERFORMANCE AND AVAILABILITIES OF ROBUST AND NON-ROBUST MODEMS USING MULTIPLE FREQUENCIES**

Vivianne Jodalen and Torgeir Bergsvik
Norwegian Defence Research Establishment (FFI)
P.O. Box 25, N-2007 Kjeller
vjo@ffi.no bet@ffi.no

Paul S. Cannon and Paul C. Arthur
DERA Malvern
Malvern, Worcs.
WR143PS, UK
pcannon@dera.gov.uk pcarthur@dera.gov.uk

SUMMARY

The high latitude HF channel has been measured and characterised in terms of Doppler spread, delay spread and signal-to-noise ratio. The performance of data modems compliant with STANAG 4285 (2400 bps mode, non-robust) and STANAG 4415 (75 bps, robust) has been determined over a comprehensive range of simulated channel conditions. A comparison is made between the channel measurements and the modem characterisations, and modem availabilities during the measured channel conditions are determined. The robust modem shows 50-70% higher availability than the non-robust modem on the measured paths. The most important factor contributing to modem failure is low signal-to-noise ratio.

The paper also addresses the number of frequencies required for a HF circuit to achieve maximum communications availability. On a 1500 km path it is shown that the STANAG 4285 modem requires 6-8 frequencies whereas the STANAG 4415 modem reaches maximum availability with 2-3 frequencies.

1 INTRODUCTION

High speed modems such as STANAG 4285 (NATO (1)) (2400 bps) are unlikely to perform well on high latitude paths that experience severe multipath, rapid fluctuations and absorption. Under these conditions the data rate has to be reduced, and robust coding and modulation must be utilized in order to reduce the error rate. The minimum signal to noise ratio (SNR), the maximum multipath spread (MS) and Doppler spread (DS) that a modem can tolerate whilst meeting a required bit error performance can be determined by measurements under simulated channel conditions (Arthur and Maundrell (2)).

The Doppler And Multipath Sounding Network (DAMSON) has, for many years, collected data on multipath spread, Doppler spread and signal to noise ratio on different paths in northern Scandinavia. In this paper we use DAMSON data and modem performance characterisations to infer the percentage availability of modems if operated on the DAMSON paths. STANAG 4285 (mode 2400 bps, long interleaver) and STANAG 4415 (NATO (3)) (75 bps, mode long interleaver) have been selected for analysis being a non-robust and a robust waveform, respectively. When the modems fail, we have tried to determine which of the channel parameters (SNR, MS or DS) causes the modem to fail.

Traditionally, HF users have been assigned a very limited number of frequencies, maybe only one day-frequency and one night-frequency. The communications availability of such a system is then often low, and sometimes there is no communications at all. By increasing the number of assigned frequencies the communications availability can increase, but not necessarily in proportion to the number of frequencies assigned. In the second part of this paper we determine the modem availability gain which can be derived from a pool of assigned frequencies. This information can be used for frequency allocation and in the automatic channel selection process (ACS) of automated HF systems where a number of frequencies are sounded before the best frequency is selected.

2 DAMSON MEASUREMENTS

The DAMSON measuring equipment is described in Davies and Cannon (4) and previous analysis is reported in Angling et al (5). This channel sounder uses pulse compression sounding within a bandwidth of 3 kHz, and after real-time processing at the receiver the scattering function of the channel is stored for later analysis. For the DAMSON data collected and used in this analysis the delay resolution of the sounding equipment was 0.6 ms, the delay range 12.5 ms, the frequency resolution 0.65 Hz and the frequency range ± 40 Hz.

From received scattering functions, channel parameters such as Doppler spread, multipath spread and signal-to-noise ratio are extracted. The SNR is measured as the signal energy over all modes relative to the background noise in the 3 kHz channel. The multipath spread for this analysis is a composite delay spread, ie the delay between the leading edge of the first occurring mode at the receiver and the trailing edge of the last occurring mode. The edges are defined as the limits containing 80% of the power. In order to determine Doppler spread, a weighted sum of the modes is calculated and the 80% power limits determined.

The equipment runs automatically and measurements have been taken 24 hours a day. The measurement schedule cycles through 10 frequencies from 2.8 to 21.9 MHz in 10 minutes storing one scattering function for each frequency. If signals have not propagated, or have been disrupted by interference, a scattering function is nevertheless stored, but the instant is identified in the analysis software as containing no signals. For each frequency the maximum number of scattering functions is 144 in 24 hours.

In this work a DAMSON channel measurement is considered to be a point in three dimensional space that describes the channel conditions at the time of the measurement. The three dimensions are SNR, DS and MS.

3 PERFORMANCE CHARACTERISATION OF MODEMS

A procedure for deriving comprehensive modem performance characterisations is described in Arthur and Maundrell (2). Modems are assessed through an automated process which employs an HF simulator based on the standard Watterson model. A series of tests is performed, with each test using a specific combination of Doppler spread and multipath spread, and the SNR being adjusted until the modem bit-error rate (BER) falls within a specified range. This value of SNR is identified as the 'threshold SNR' in order to give acceptable performance of the modem with the specified channel conditions. The characterisations for this analysis employed a BER range of $5 \cdot 10^{-3}$ to $0.2 \cdot 10^{-3}$, Doppler spreads ranging from 0 to 40 Hz in steps of 1 to 4 Hz and multipath spreads ranging from 0 to 40 ms in steps of 1 to 4 ms. If the Doppler spread and multipath spread were such that the measured BER was greater than $5 \cdot 10^{-3}$ when the SNR was set to 60 dB, then in our analysis we call these channel conditions 'saturated'. The 'threshold SNR' for various Doppler and multipath conditions are characterised in three dimensional space constituting a 'performance surface' for the modem. In general low DS/MS values will require a low SNR whereas large DS/MS values will require a large SNR or will be saturated.

4 AVAILABILITY OF MODEMS ON THE DAMSON PATHS

This work combines the measured channel conditions (SNR', DS', MS') with the simulated performance surfaces of the selected modems in order to determine whether the modems would have worked during the measured channel conditions. The method used is illustrated in Figure 1. The DAMSON point (SNR', DS', MS') is referenced to the closest point on the surface (SNR, DS, MS). If $SNR' > SNR$, the DAMSON point is above the simulated surface and we say that the modem will work during the measured channel condition.

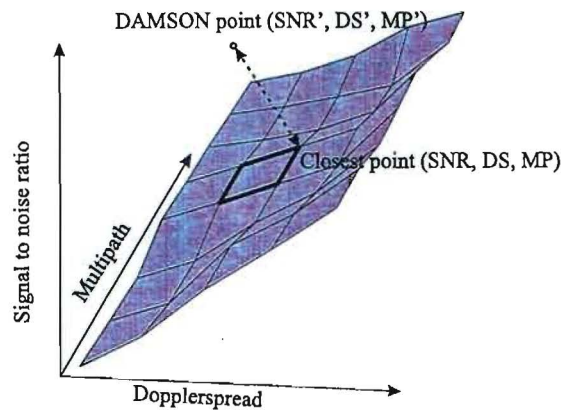


Figure 1 Method of comparison between DAMSON measurements and simulated performance of modems

We have arbitrarily selected time periods of between 7 and 40 days of DAMSON data from each season, and we have determined the percentage availability of the modem when signals have propagated. Instances of no DAMSON propagation are not counted and so the result is not an 'overall' availability. Each frequency has been compared separately.

4.1 RESULTS ON THE ISFJORD-LYCKSELE PATH

Availabilities have been calculated for day time and night time, different seasons, different DAMSON paths (auroral paths/sub-auroral paths), etc. We show here a few results, but more comprehensive results can be found in Bergsvik (6).

The availability of STANAG 4285 (2400 bps) during the period 3-13 Sept 1996, hours 19-01 UT on the 1500 km north-south Isfjord(78°) - Lycksele(64°) path is shown in Figure 2. Likewise, the availability of STANAG 4415 (75 bps) is shown in Figure 3. For this period the mean SNR for frequencies above 3 MHz varies between 5 and 13 dB, the maximum mean DS on a frequency is 4.1 Hz and the maximum mean multipath spread is 1.5 ms. The standard deviation of the measured channel parameters is small. So channel conditions in this period are thus fairly benign.

On this path for the September period, we see that across the frequencies the robust low data rate communication did achieve a 60-80% higher availability than the non-robust high data rate communication. A similar trend is observed for day time conditions, except that the highest and lowest frequencies show lower availability for the robust waveform.

5 CAUSE OF MODEM FAILURES

When DAMSON channel measurements have been identified as lying below the characterised surface, the modem is judged not to work. We have then determined which channel parameters cause the failure of the modem by comparing the distance from the DAMSON point to the surface in each of the three dimensions. If the distance below the surface in one particular dimension is greater than a certain threshold, we count the channel parameter in that dimension as being a cause of the failure. All three parameters can be counted as causes of failure for the same DAMSON point. The thresholds provide a guard band which allows for the resolution of the measurements and characterisation. The thresholds are set to 2 dB for SNR, 3 Hz for Doppler spread and 1 ms for multipath spread. If the location of a DAMSON point is such that no distance to the surface can be found in a given dimension, then the respective channel parameter is deemed not to be the cause for the failure. Further, if the DAMSON point is located in the saturated region of the characterisation, the SNR will generally not be counted as being the cause of the failure. This is the general method of determining causes of modem failures. For the robust modem (STANAG 4415) however, saturation is never reached within the Doppler and multipath ranges tested, and the general method can be simplified.

5.1 RESULTS FOR THE ISFJORD-LYCKSELE PATH

Statistics on the cause of modem failures have been determined for the same data as shown in Figure 2 for the non-robust modem. In Figure 2 we saw that there were more DAMSON channel measurements lying below the characterisation surface than above. (A 50% availability would indicate half the points above the surface and half below). From Figure 4 we see that on all frequencies more than 70% of the data points lying below the surface are more than 2 dB below it, and we thus say that low SNR is the most important factor contributing to the failure of the modem in this period and on this path. Large Doppler spreads and multipath spreads cause failures to a lesser extent, but as stated previously, the selected period was reasonably benign.

For the robust modem there were very few data points lying below the surface and none of the modem failures could be attributed to Doppler spread or multipath spread, but purely to low SNR. There were no DAMSON datapoints lying outside the simulated ranges of Doppler

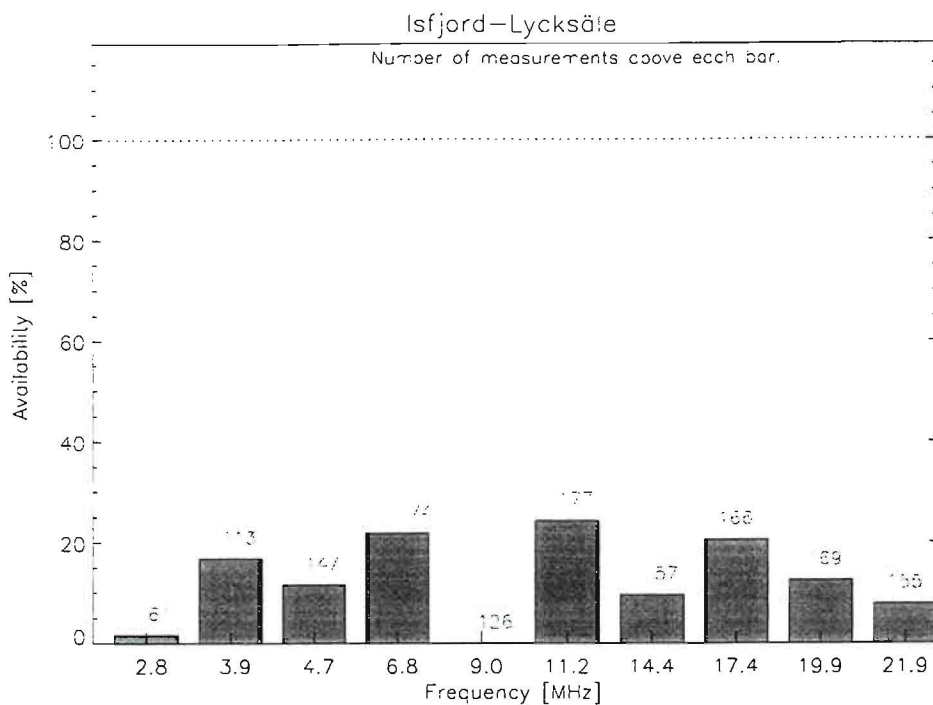


Figure 2 Modem availability on propagating channels for STANAG 4285 (2400 bps, long interleaver) for period 3-13 Sept 1996, hours 19-01 UT

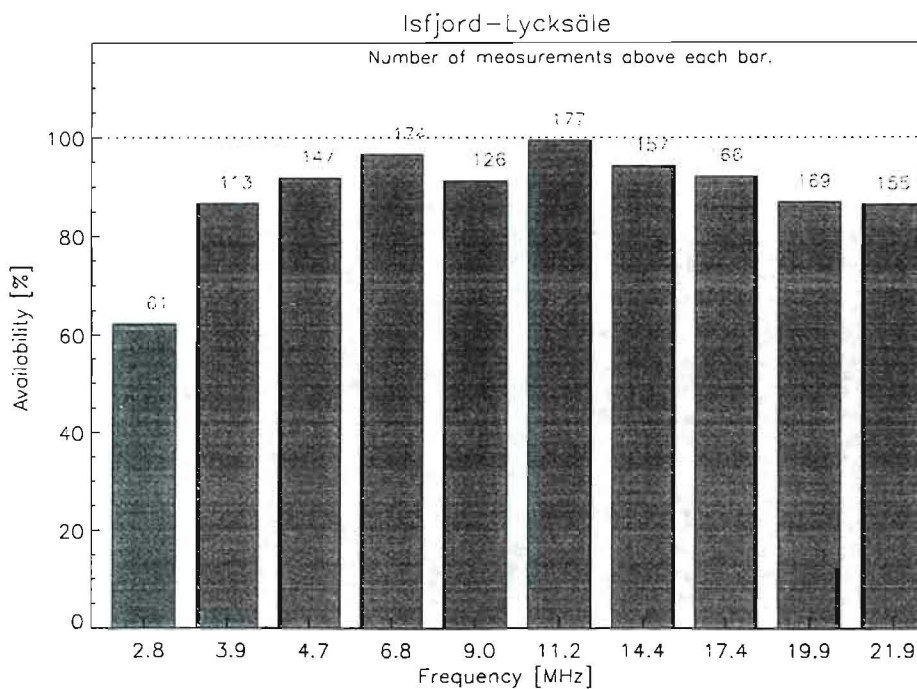


Figure 3 Modem availability on propagating channels for STANAG 4415 (75 bps, long interleaver) for period 3-13 Sept 1996, hours 19-01 UT

spread and delay spread. The trends observed for each modem were the same for the day period. Experience indicates that for a geomagnetically disturbed period the Doppler spread and multipath spread would be a more important cause of failure for the non-robust modem. For the ranges of Doppler and delay spread measured by DAMSON under disturbed conditions, we believe that the robust modem would still give acceptable performance. Further data analysis is required to confirm this.

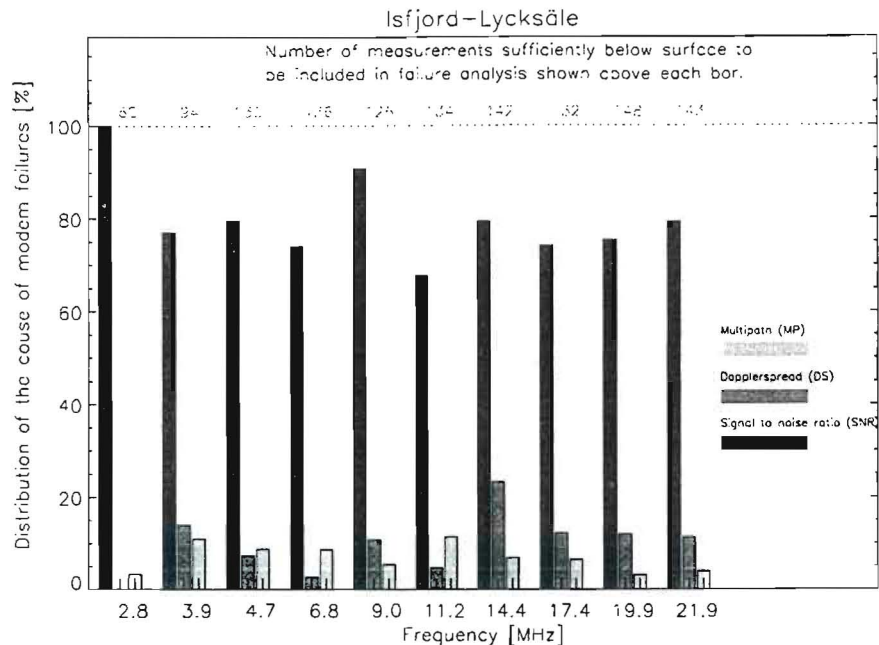


Figure 4 Distribution of the cause of modem failures for STANAG 4285 (2400 bps, long interleaver) for period 3-13 Sept 1996, hours 19-01 UT

6 ASSESSMENT OF INCREASED AVAILABILITY OF MODEMS BY HAVING MULTIPLE FREQUENCIES AVAILABLE

If an HF user has only one assigned frequency, that frequency may not propagate at certain times of day, or it may be disturbed by interference so that the availability of communications is low. If the user is allowed to use an additional frequency, then the availability of communications may increase considerably. Further frequencies might be expected to provide further improvements, but it is likely that there will be diminishing gains. Based on signal propagation on the ten allocated DAMSON frequencies and the simulated performance of the two selected modems, we assess here the optimum number of frequencies that a user should have available.

First, predicted reliabilites from ICEPAC (Stewart and Hand (7)) of all the DAMSON frequencies give an individual ranking of the frequencies. The predicted best frequency is then selected, and we assume that this is the only assigned frequency. For a given modem we

then count the number of times this DAMSON frequency has been propagating and at the same time the data point lies above the simulated performance surface. This percentage availability represents an 'overall' availability, which means that instances of no propagation have also been considered. We then select the two best frequencies based on the predictions, and count the number of instances where one or both of the frequencies have been propagating and at the same time channel conditions are sufficiently good that the modem would have worked. This analysis is continued for three, four, up to ten DAMSON frequencies. The method is illustrated in Figure 5.

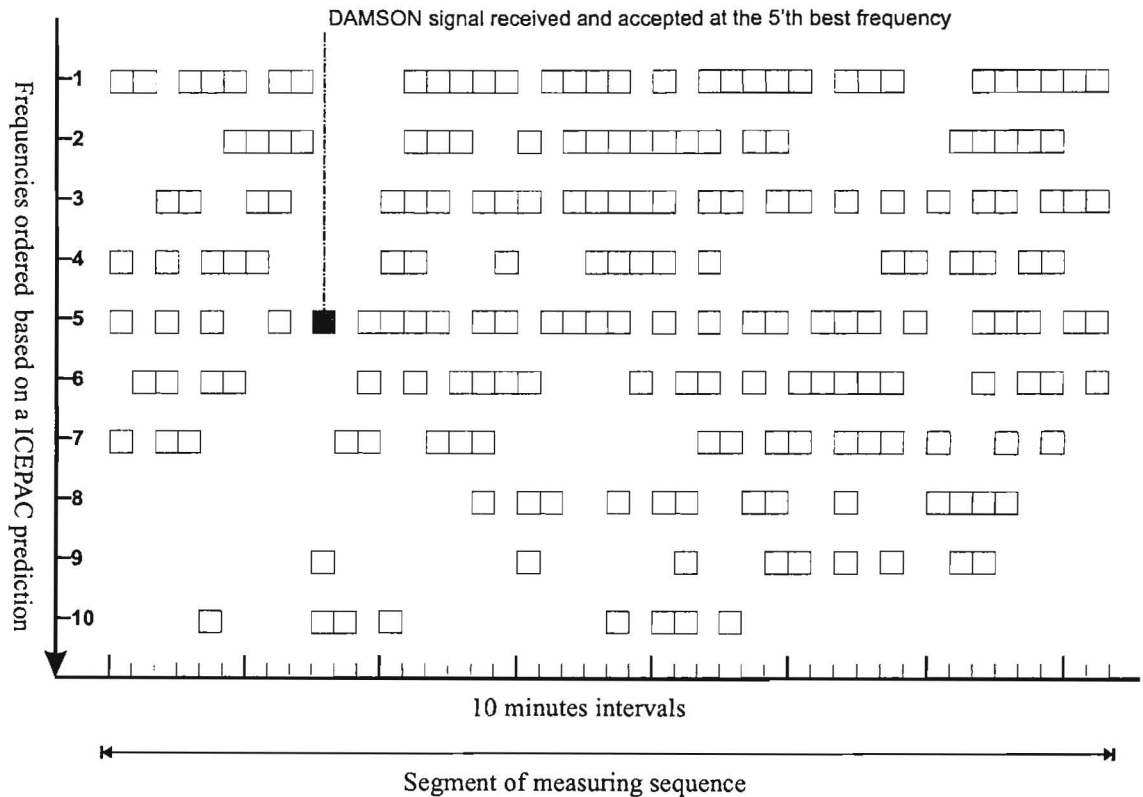


Figure 5 Method of calculating 'overall' availability of modems when a set of frequencies is available. Boxes indicate that signals have been received and the modem test has been met

6.1 RESULTS ON THE ISFJORD-LYCKSELE PATH

The increasing 'overall' modem availability derived from having multiple frequencies available is shown in Figure 6 for the non-robust modem and in Figure 7 for the robust modem. The time period is the same as for the previous analysis. For the non-robust modem the availability continuously increases to a maximum of 71% until nine frequencies are added to the frequency set. However, the largest gains are achieved by adding the first two frequencies to the set. If the frequency ranking from prediction is not in agreement with the modem performance on the different frequencies, this will be shown in the figures as a lower increase in availability from one frequency to the next than for subsequently added frequencies.

For the robust modem a maximum true availability of 90% is reached by just having two frequencies in the frequency set. Better availability is not achieved by adding more frequencies.

For daytime conditions (hours 09-13 UT) the situation is similar. For the non-robust modem seven frequencies are needed in order to reach a maximum overall availability of 52%, whereas for the robust modem 77% overall availability is achieved by three frequencies and 80% is achieved by six frequencies.

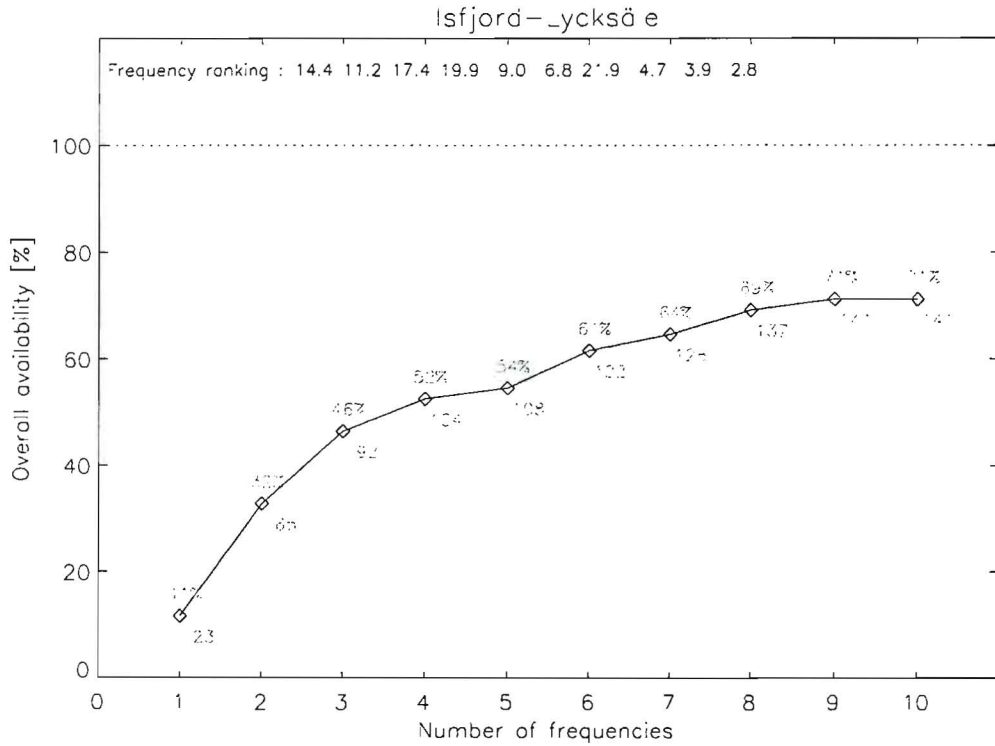


Figure 6 'Overall' availability of STANAG 4285 (2400 bps, long interleaver) when the frequency set consists of 1,2,...10 frequencies. Period 3-13 Sept 1996, hours 19-01 UT. Maximum possible number of measurements for period: 198

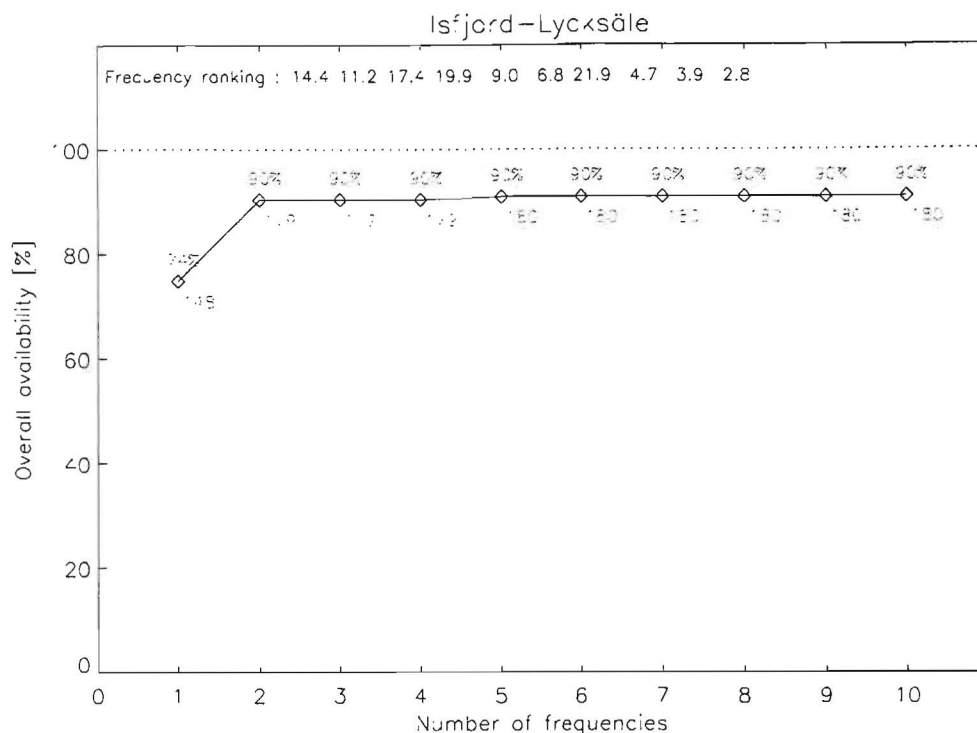


Figure 7 'Overall' availability of STANAG 4415 (75 bps, long interleaver) when the frequency set consists of 1,2,...10 frequencies. Period 3-13 Sept 1996, hours 19-01 UT. Maximum possible number of measurements for period: 198

The number of necessary frequencies found here based on the DAMSON data may be slightly lower than for a traditional communications system since DAMSON uses pulse compression sounding which suppresses interferers.

7 THE HARSTAD-KIRUNA PATH

This is a short, 190 km east-west path at latitudes 67°-68°N. This DAMSON path shows excessive multipath at all times and Doppler spreads in excess of 80 Hz when the ionosphere is disturbed. Even if the path is short, propagation exists on all DAMSON frequencies because of off-great-circle propagation. Seven days of data from a quiet period in April/May 96 have been analyzed.

Modem availability on propagating channels for the non-robust modem is, for this path, extremely low; only 20% for a few low frequencies. In general, the modem fails because of low SNR, particularly at the higher frequencies. During daytime, large multipath is another cause of failure for up to 70% of the DAMSON datapoints. During the night, Doppler spread is the next most important factor that causes the modem to fail (up to 50 % of data points).

For the robust modem the availability is 90-100% for the lower frequencies, decreasing to approx 10% for 21 MHz. Low SNR is the only reason for this modem to fail on this path.

There is a large gap between the maximum overall availability that can be reached for non-robust and robust modems on this path. However, the number of frequencies necessary in order to achieve the maximum availability is the same for both modems; two frequencies are necessary during day and three frequencies at night. So if frequency assignments are made according to ICEPAC predictions, the data analyzed here show that just three frequency assignments are enough for this path.

8 CONCLUSIONS

One period on each DAMSON path has been analyzed so far. The periods have been arbitrarily chosen based on data availability, and they are from different seasons. General conclusions that can be drawn based on all the paths are as follows:

The availability of the robust modem (STANAG 4415, 75 bps) when signals are propagating is 50 %-70 % higher than for the non-robust modem (STANAG 4285, 2400 bps).

When both modems fail, even if signals are propagating, the most important reason is low SNR of the received signal. Doppler spreads and delay spreads are not seen to be the reason for failure of the robust modem, but for the non-robust modem these two channel parameters can significantly contribute to the failure. On the short Harstad-Kiruna path, Doppler spread is an important factor at night, whereas multipath spread is more important during day.

The ranking of frequencies based on ICEPAC predicted reliability shows good agreement with the experimental data.

The non-robust modem needs more assigned frequencies (6-8) to reach a combined maximum 'overall' availability than the robust modem (3-5). However, on the short Harstad-Kiruna path, 2-3 frequencies are enough for both modems.

The number of necessary frequencies is not different for night and day, except on the short path where 2 frequencies are necessary during the day and 3 during the night for both modems.

Comparing a low data rate modem with a high data rate modem may seem odd since they are intended for different purposes. This study points out that data rate in certain areas must be sacrificed for availability and a limited frequency resource.

REFERENCES

- (1) STANAG 4285 (1990): Characteristics of 1200/2400/3600 bit per second modulators/demodulators for HF radio links, NATO, Brussels
- (2) Arthur P C, M J Maundrell (1997): Multi-dimensional HF modem performance characterization, *Conference Publication 441*, IEE, 7th Int Conf on HF Radio Systems and Techniques, Nottingham, UK
- (3) STANAG 4415 (1998): Characteristics of a robust non-hopping serial tone modulator/demodulator for severely degraded HF radio links, NATO, Brussels
- (4) Davies N C, P S Cannon (1993): DAMSON- A system to measure multipath dispersion, Doppler spread and Doppler shift on multi-mechanism communications channels, CP-543, AGARD Symposium on communication channels, Rotterdam, Netherlands
- (5) Angling M J, P S Cannon, N C Davies, T J Willink, V Jodalen, B Lundborg (1998): Measurements of Doppler and multipath spread on oblique high-latitude HF paths and their use in characterizing data modem performance, *Radio Science, Vol 33, no 1, pp 97-107*
- (6) Bergsvik T (1998): Evaluering av HF-modemer og flerfrekvens systemer paa hoye breddegrader basert paa kanalmaalinger, *FFI-Rapport/?*, available by 1st of Aug 1998
- (7) Stewart F, G Hand (1990): ICEPAC, private communication, ITS, U.S. Dept. of Commerce, Boulder, Colorado.

FORDELINGSLISTE

FFIE Dato: 17 november 1998

RAPPORT TYPE (KRYSS AV)		RAPPORT NR	REFERANSE	RAPPORTENS DATO				
<input checked="" type="checkbox"/>	RAPP	<input type="checkbox"/>	NOTAT	<input type="checkbox"/>	RR	98/04983	FFIE/742/110	17 november 1998
RAPPORTENS BESKYTTELSESGRAD				ANTALL EKS UTSTEDT	ANTALL SIDER			
UGRADERT				80	96			
RAPPORTENS TITTEL				FORFATTER(E)				
EVALUERING AV HF-MODEMER OG FLERFREKVENS SYSTEMER BASERT PÅ KANALMÅLINGER PÅ HØYE BREDDEGRADER				BERGSVIK Torgeir				
FORDELING GODKJENT AV FORSKNINGSSJEF:				FORDELING GODKJENT AV ADM DIREKTØR:				

EKSTERN FORDELING

INTERN FORDELING

ANTALL	EKS NR	TIL	ANTALL	EKS NR	TIL
1		Forsvarets overkommando/ Hærstaben	14		FFI-Bibl
			1		Adm direktør/stabssjef
			1		FFIE
1		Forsvarets overkommando/ Informatikkstaben	1		FFISYS
			1		FFITOX
			1		FFIU
1		Forsvarets overkommando/ Sjøforsvarsstaben	1		FFIVM
			1		Torleiv Maseng, FFIE
			1		Anton B Leere, FFIE
1		Sambandsinspektøren	1		Bjørn Skeie, FFIE
			1		Bodil Hvesser Farsund, FFIE
1		Forsvarets Tele- og Datatjeneste	1		Frøde Lillevold, FFIE
			1		Geir Hallingstad, FFIE
1		Hærens forsyningskommando	1		Jostein Sander, FFIE
			1		Ove K Grønnerud, FFIE
1		Luftforsvarets forsyningskommando	1		Snorre Prytz, FFIE
			1		Svein Haavik, FFIE
1		Sjøforsvarets forsyningskommando	1		Vegard Arneson, FFIE
			1		Bjørn Jacobsen, FFIE
1		FO/SST	1		Vivianne Jodalen, FFIE
1		v/OK Lars Ellingsen	1		Torgeir Bergsvik, FFIE
			1		Eivind Thrane, FFIE
1		Hærens Jegerkommando	1		Tom A Blix, FFIE
1		v/sambandsoffiser 2451 Rena	1		Ulf-P Hoppe, FFIE
			1		Torkild Eriksen, FFIE
			1		Nils A Sæthermoen, FFIE
1		Marinejegerkommando ROS 9442 Ramsund	9		Arkiv, FFIE

FFI-K1 Retningslinjer for fordeling og forsendelse er gitt i Oraklet, Bind I, Bestemmelser om publikasjoner for Forsvarets forskningsinstitutt, pkt 2 og 5. Benytt ny side om nødvendig.

EKSTERN FORDELING

INTERN FORDELING

ANTALL	EKS NR	TIL	ANTALL	EKS NR	TIL
1		Sambandsavdelingen DKN			
1		v/radiooffiser			
		Postboks 60			
		9401 Harstad			
1		EST tropp/EKKP			
		Postboks 232			
		9250 Bardu			
1		SBTR/STKP/TMBN			
		Postboks 55			
		3645 Heistadmoen			
1		Sambandsoffiseren			
		Oppklesk/N			
		Postboks 16			
		9250 Bardu			
1		Hærens forsyningskommando			
1		v/Axel Viborg			
1		Sjøforsvarets forsyningskommando			
1		v/Strømsnes			
1		Sjøforsvarets forsyningskommando			
1		v/sj.ing Per W Nieuwejaar			
1		Hærens forsyningskommando			
1		v/Terje Bergmann			
1		KNM Tordenskjold			
1		v/Finn Norstad			
1		Distriktskommando Østlandet/ Sambandsavdelingen			
1		v/radiooffiser			
		Postboks 4024 Postterminalen			
		2301 Hamar			
1		Våpenskolen for Hærens Samband			
1		v/Oblt Geir Høiland			