

# LoranC sårbarhet.

LoranC evne til å motstå jamming/spoofing

**Atle Ohren**

Master i elektronikk

Oppgaven levert: Juni 2010

Hovedveileder: Odd Gutteberg, IET

Biveileder(e): Børje Forssell, IET  
Ørnulf Kndola, FFI



# Oppgavetekst

Betrakt LoranCs sårbarhet for signalforstyrrelser. Gi en vurdering av sårbarheten til konvensjonelle LoranC og foreslå et hensiktsmessig oppsett for å forstyrre LoranC

Oppgaven gitt: 15. januar 2010  
Hovedveileder: Odd Gutteberg, IET



# **LoranC et robust navigasjonssystem?**

**ved**

**Atle Ohren**

***Masteroppgave 2010***



*Fakultet for informasjonsteknologi, matematikk og  
elektroteknikk*  
*NTNU*

# 1 Innledning

Det bakkebaserte navigasjonssystemet LoranC har blitt sett på som det eneste reserve-systemet til satellittbaserte navigasjonssystemer.. Ett hovedargument er at LoranC har egenskaper som gjør systemet mindre sårbart for tilsiktede signalforstyrrelser (jamming) enn satellittbaserte systemer, eksempelvis Global Navigation System (GPS). Denne oppgaven har til formål å utprøve om denne påstanden er riktig.

En LoranC-mottaker beregner egen posisjon ved å måle tidsforskjeller mellom pulser mottatt fra sendere i kjente posisjoner. I løpet av 1970-åra ble LoranC videreutviklet og hadde dekningsområdet over nesten hele nordatlanten. Systemet viste seg å være spesielt egnet til navigasjon til sjøs og ble fort en nødvendighet for fiskeriflåten. På denne tiden var også andre systemer med regional/global dekning tilgjengelig (DECCA og Omega).

I senere tid har det jevnlig vært snakk om å nedlegge LoranC, men systemet har vist seg nyttig og billig i drift at det hittil har overlevd. Nå i 2010 er systemet igjen truet av nedleggelse.

Den amerikanske kystvakten (USCG) offentliggjorde en note i Federal Register den 7.1.2010 at terminering av LoranC ikke vil ha noen negativ innvirkning på sikkerheten til maritim navigasjon. Utfasingen av systemet starter 8.febr med mål at alle USAs LoranC-sendere skal settes ute av drift innen 1.okt 2010. Dette er i tråd med USAs president Obamas budsjettforslag der USCG fikk mandat til å nedlegge systemet hvis dette ikke påvirker USA sikkerhet eller de statlige krav til navigasjon. Samtidig har det amerikanske DHS <sup>1</sup> gitt sin garanti for at det ikke er behov for LoranC systemet eller infrastrukturen som en reserveløsning for GPS eller til å dekke noen statlige krav til navigasjon.

Selv om offentliggjøringen i Federal Register indikerer at det nå må tas en avgjørelse om hvilket system som skal fungere som reserveløsning for GPS vil nok dette stoppe utviklingen av eLoran systemet og tilhørende mottakerutstyr(red.adm). Videre konkluderer USCG med at: *"Hvis det viser seg at det er behov for et uavhengig reserve-system til GPS vil DHS utføre en analyse over potensielle systemer. Det vil ikke være nødvendig å videreføre LoranC systemet for bruk i denne analysen"*. De underliggende betraktninger og analyser USCG måtte ha gjennomført for å komme til denne konklusjonen går stikk i strid med konklusjoner både fra Volpe og IAT<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup>Department of Homeland Security

<sup>2</sup>Se (Ohren 2009)

## 2 Sammendrag

Grunnlaget for det arbeidet som er utført i denne rapporten er påstanden om LoranCs robusthet som navigasjonssystem. Robustheten til systemet måles i systemets egen evne til å motstå interferens (absolutt robusthet) og hvor robust LoranC er i forhold til andre navigasjonssystemer (relativ robusthet). Fokuset i denne rapporten er å gi en beskrivelse av navigasjonssystemet LoranC, hvilke faktorer som påvirker signalet langs utbredelsesveien og hva som skal til for å interferere med disse signalene. Denne oppgaven har i tillegg til en teoretisk betraktning også utført jammemålinger av en LoranC mottaker. De teoretiske beregningene sammen med observasjonene i det praktiske forsøket skal danne grunnlaget for et hensiktsmessig oppsett av en mobil LoranC jammerenhet.

Ønsker man å påvirke en mottakers posisjonsangivelse er det viktig at man kjenner til virkemåten til systemet og prinsippene brukt i mottakerne. Kapittel 4.2 tar for seg de teoretiske aspektene ved LoranC systemet og kap 4.3 omhandler virkemåten til en LoranC mottaker.

Søken etter å finne sårbarheten til systemet startes med å se på de potensielle feilkildene som systemet må ta høyde for under normal drift. LoranC signalene påvirkes av underlaget (den elektriske ledeevnen), topografien, årstiden og de aktuelle atmosfæriske forholdene. Dette er degraderende faktorer som LoranC-systemet må ta med i beregningene for å oppnå systemkravene til posisjonsnøyaktighet. For å gi en bedre forståelse for hva LoranC signalene ved normal drift påvirkes av vil kap.4 gi en gjennomgang av utbredelse av LoranC-signaler og hvordan den atmosfæriske støyen påvirker disse signalene.

Videre gir kap 4.7 en introduksjon av generelle signaltyper og modulasjoner som kan benyttes til å interferere med LoranC-signalene. Dette er signaler som videre skal benyttes som jamme/narre signaler i de praktiske målingene.

Grensesnittet mellom det elektriske interferenssignalet (jamming/spoofing) og utbredelsesmediumet (eteren) er antennen, og på grunn av at LoranC er et lavfrekvent navigasjonssystem vil signalenes lange bølgelengde skape utfordringer ved antennedesignet. I denne rapporten vil dette gjøre seg mest gjeldende ved at størrelsen til LoranC senderantennen begrenses av kravet til mobilitet hos jammeenheten, mens god antenneeffektivitet krever en fysisk stor antenne. Kap 4.8 gir en oversikt over disse utfordringene og viser beregninger av en antenne som kan benyttes i et slikt mobilt jammeoppsett.

or beregning av feltstyrkeverdiene til LoranC-signalene og den atmosfæriske støyen ved målestasjonen ble det utviklet og brukt et Excel-ark (zip-vedlegg). Kapittel 5 gir en gjennomgang av dette Excel-arket og en oversikt over hva som kreves av en slik

jammerenhet.

I kapittel 6 beskrives rapportens praktiske målinger. For å avdekke hva som er den mest effektive formen for interferens med LoranC-signaler ble målingene utført ved bruk av; to typer antenner, forskjellige signal/modulasjon-typer og varierende signalstyrke/avstand. Videre ble de teoretiske signalberegninger for LoranC-signalet og den atmosfæriske støyen sammenlignet med signalverdiene som ble observert under jamme-målingene. Egenskapen og ytelsen til jammeantennene og posisjonsplottet fra LoranC mottakeren ble også observert og videre benyttet til å fastslå effektiviteten av interferensen med LoranC-signalene og jamme-effektivitet.

Denne rapporten avsluttes med at de teoretiske resultatene i kombinasjon med de praktiske undersøkelsene gir en bedømmelse av LoranC sin robusthet, og et hensiktsmessig oppsett av et mobilt LoranC-jammesystem.

## 2.1 Forord

Denne oppgaven avslutter masterutdanningen i romteknologi og navigasjon ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet i Trondheim. Arbeidet har pågått i vårsemesteret 2010 over en periode på 20 uker.

Jeg vil rette en takk til min veileder ved NTNU Professor Börje Forssell, for verdifull veiledning og innspill under hele prosjektperioden. En stor takk går også til Forsker Ørnulf Kandola hos FFI for oppdraget og kyndig veiledning. Til slutt jeg takke Sturle Søyvik FFI/Horten, Ole Arnstein Borgen FLO/IKT og Prof.dr. Durk van Willigen Re-elektronika for all hjelp i forbindelse med feltforsøkene.

Trondheim, 10. juni 2010

---

Atle Ohren



## 2.2 Oppgaveformulering/mål

**Masteroppgavens oppgaveformulering:**

**BETRAKT LORANCS SÅRBARHET FOR SIGNALFORSTYRRELSER. GI EN  
VURDERING AV SÅRBARHETEN TIL KONVENSJONELLE LORAN C OG FORESLÅ  
ET HENSIKTMESSIG OPPSETT FOR Å FORSTYRRE LORAN C**

# Innhold

<b>1</b>	<b>Innledning</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Sammendrag</b>	<b>3</b>
2.1	Forord . . . . .	4
2.2	Oppgaveformulering/mål . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Sikker navigasjon</b>	<b>9</b>
3.1	Er støttesystemer til GPS nødvendige? . . . . .	9
3.1.1	Svakheter ved GNSS . . . . .	11
3.1.2	Forbedre integriteten til GPS/GNSS . . . . .	12
3.2	Bruk og bruksområder for LoranC . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Teori</b>	<b>15</b>
4.1	LoranC/Eurofix . . . . .	15
4.1.1	Posisjonsbestemmelse . . . . .	16
4.2	Generell virkemåte til en LoranC mottaker . . . . .	18
4.3	Interferens med kontinuerlige signaler . . . . .	22
4.3.1	Synkron interferens . . . . .	23
4.3.2	Nær-synkron interferens . . . . .	23
4.3.3	Asynkron interferens . . . . .	24
4.3.4	Effekt av UB-interferens . . . . .	24
4.4	SNR, LoranC . . . . .	24
4.5	Bølgeutbredelse . . . . .	25
4.5.1	Innledning . . . . .	25
4.5.2	Kurver for jordbølgeutbredelse, ITU-R 368-9 . . . . .	26
4.5.3	Bølgeutbredelse over en homogen overflate . . . . .	27
4.5.4	Bølgeutbredelse over en ikke-homogen overflate . . . . .	27
4.5.5	Analytiske metoder . . . . .	27
4.5.6	Sommerfeld og Norton . . . . .	27
4.5.7	Eckersleys metode . . . . .	28
4.5.8	Millingtons metode . . . . .	29
4.5.9	Diffraksjon . . . . .	33
4.6	Atmosfærisk støy . . . . .	33
4.6.1	Atmosfærisk støy, CCIR 322 og ITU-R 372 . . . . .	34
4.6.2	Utstyr for måling av atmosfærisk støy, Frøya . . . . .	39
4.7	Signaler og modulasjonstyper . . . . .	40
4.7.1	Generelt om modulasjon . . . . .	40
4.7.2	Modulasjonstyper brukt til jamming . . . . .	40

4.8	Antenner . . . . .	41
4.8.1	Antennestørrelser . . . . .	41
4.8.2	Antennens reaktivefelt, fjernfelt og nærfelt . . . . .	42
4.8.3	Problemer/utfordringer ved antennesesignet . . . . .	42
4.8.4	Måter å forbedre egenskapene til en monopol antenne . . . . .	43
4.8.5	Beregninger jammeantenne . . . . .	44
4.8.6	Beregning av valgt monopolantenne, monopol antenne med top-hat . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Resultat av teoretiske betraktninger av signalstyrker</b>	<b>51</b>
5.1	Bølgeforplantning og signalstyrke LoranC signaler . . . . .	51
5.1.1	Beregning av signalnivåer ved hjelp av Excel-program . . . . .	53
5.1.2	Resultat av signalberegninger . . . . .	55
5.2	Teoretisk beregning av utsendt effekt, jammerenhet. . . . .	57
5.2.1	Jamming av LORSTA Bø, teoretiske beregning . . . . .	58
5.2.2	Jamming av LORSTA Jan Mayen, teoretiske verdier . . . . .	59
5.2.3	Jamming av LORSTA Ejde, teoretiske verdier . . . . .	60
<b>6</b>	<b>LF propogasjon/jammemålinger</b>	<b>62</b>
6.1	Introduksjon . . . . .	62
6.2	Oppsett av test/målestasjon . . . . .	62
6.2.1	Observasjonsantenner . . . . .	63
6.2.2	Jammeantenner . . . . .	63
6.2.3	Mottakere . . . . .	63
6.3	Modulasjonstyper . . . . .	64
6.3.1	Umodulert bærebølge, UB . . . . .	64
6.3.2	Frekvenssveipet bærebølge, FSB . . . . .	64
6.3.3	Amplitudemodulasjon, AM . . . . .	65
6.3.4	Frekvensmodulasjon, FM1 og FM2 . . . . .	65
6.4	Måleprosedyrer . . . . .	66
6.4.1	Prosedyre for oppsett av måleutstyret . . . . .	66
6.4.2	Jammeprosedyre . . . . .	67
6.5	Observasjoner . . . . .	67
6.5.1	Sammenligning av de teoretisk beregning og de målte støy-verdiene. 67	
6.5.2	Teoretisk beregnet vs. målt LoranC signal . . . . .	69
6.5.3	Jammeobservasjoner . . . . .	71
6.5.4	Antenne observasjoner . . . . .	75
6.5.5	Drøfting, jammeobservasjoner . . . . .	77
<b>7</b>	<b>Konklusjon, diskusjon og anbefalinger</b>	<b>85</b>
7.1	Bølgeutbredelse . . . . .	85
7.1.1	Diskusjon, teoretiske beregninger av atmosfærisk støy . . . . .	85
7.1.2	Diskusjon, teoretiske beregninger av feltstyrke . . . . .	85
7.2	Tilsiktet interferens . . . . .	86
7.2.1	Signaler brukt til tilsiktet interferens . . . . .	86

7.3	Komponentene i et mobilt jammeoppsett. . . . .	88
7.3.1	Transmitter/forsterker . . . . .	88
7.3.2	Jammeantenne . . . . .	89
7.4	Oppsummering av konklusjon, er LoranC et robust navigasjonssystem? . . . . .	89
<b>8</b>	<b>Vedlegg A; Måleutstyr, jamming Frøya</b>	<b>93</b>
8.1	HP 33120A Function Generator . . . . .	93
8.2	LORADD LORANC/UTC receiver, s/n 100037, HW rev 1.0 . . . . .	94
8.3	LORADD H-field eLoran and GPS patch antenna. . . . .	98
8.4	PERSEUS 10 kHz to 30 MHz RECEIVER, Microtelecom s.r.l. Pavia di Udine, Italy . . . . .	99
8.5	Jammeantenner; Teleskopantenne og stavantenne. . . . .	103
8.5.1	Ferritt stavantenne, produsert av FFI Horten. . . . .	105
8.6	Datamaskiner . . . . .	106
	<b>List of Figures</b>	<b>113</b>
	<b>List of Tables</b>	<b>115</b>
	<b>References</b>	<b>116</b>
	<b>Bibliografi</b>	<b>117</b>

## 3 Sikker navigasjon

### 3.1 Er støttesystemer til GPS nødvendige?

I dag er GPS en primær kilde for posisjon, navigasjon og tid (PNT). Systemet benyttes som et frittstående PNT-system men også integrert med andre navigasjonssystemer/sensorer. GPS ansees av mange som det eneste og det mest komplette/presise globale navigasjonssystemet i dag. Og på grunn av GPS sin popularitet virker det som om anvendelsesområdene for GPS kun begrenses av fantasien. Det gjenspeiles når man ser på de produkter som lanseres på markedet. Dette er nok en utvikling som vil fortsette inn i fremtiden sammen med videreutvikling av GPS integrert med andre systemer som GNSS (Galileo, Glonass, Compass o.l).

For den aller største brukermassen til GNSS/GPS i dag er systemet tilstrekkelig stabilt og presist<sup>1</sup>. Men det er ingen systemer er 100% feilfritt/pålitelig, GPS er ganske nær 100% men for enkelte brukere er ikke dette godt nok. Manglende GPS-data kan skyldes systemfeil, men også tekniske feil i mottagerdelen samt dårlige mottagerforhold.

I hvilken grad påliteligheten til GPS vektlegges av brukeren er helt avhengig av behovet og bruken av systemet. Er ikke brukeren underlagt noen krav må brukeren selv danne seg et bilde over konsekvensene ved problemer med navigasjons enheten. Man kan enkelt forstå at GPS brukt som navigasjonshjelpemiddel ved en fottur eller i luftfarten trenger forskjellige grader av pålitelighet. En annen faktor som vil bestemme den praktiske bruken av GPS er hvor stor grad tilgjengeligheten til andre navigasjonssystemer er, er det kun GPS som er tilgjengelig blir det også brukt deretter. For miljøer underlagt internasjonale/statlige krav er det helt klare retningslinjer for hvordan navigasjonssystemene skal brukes og i hvor stor grad man skal ha reserve systemer eller uavhengige systemer for redundans og/eller økt integritet.

Men her er det også en differensiering mellom bruk/krav som gjenspeiler konsekvensene hvis GPS-mottakere gir uriktig informasjon. Det maritime miljøet anser GPS(DGPS)<sup>2</sup> som et primært navigasjonssystem, mens luftfarten kun betrakter GPS som et supplerende navigasjonssystem.

Et eksempel på GPS svakheter for tilsiktet interferens(jamming) belyses godt i en rapport fra (Grant & Basker 2009). I denne rapporten benyttes en 1.5W GPS-jammer til å

---

<sup>1</sup>Med bakgrunn i at GNSS benyttes til privat-bil-fritids navigasjon (Funksjoner som ikke har behov for en høy grad av integritet)

<sup>2</sup>Informasjon fra DNV



**Figur 3-1:** GPS jammere tilgjengelige på internett

jamme et fartøy. Jammingen resulterer i feil rapportering av AIS<sup>3</sup>, tap av: navigasjonsinformasjon i styrhus, oversikt over området, kartpresentasjon, autopilot feil, økt stress og feil fokus hos navigatørene. Dette er effekter som blir fremprovosert med enkle tekniske hjelpemiddel eller komplette jammere som kan kjøpes via internett. Testen ble gjennomført kun en gang på et mannskap som var klar over jammingen, den samme testen opp mot en mannskap som ikke var klar over jammingen og med dårlige sikkerhetsrutiner, vil nok kunne fremprovosere en større grad av alvorligere resultater.

Luftfarten er litt mer tilbakeholden med å betrakte GNSS som et primært navigasjonssystem på grunn av nevnte svakheter ved GPS, dette samsvarer også med de internasjonale kravene til navigasjonssystemer som kan brukes ifm luftfart<sup>4</sup> mht sikkerhet/integritet.

<sup>3</sup>Automatic Identification System, maritimt transpondersystem

<sup>4</sup>JAR/ICAO, FAA

### 3.1.1 Svakheter ved GNSS

GNSS<sup>5</sup> er fellesbetegnelse for alle navigasjonssystemene som baserer seg på signaler fra satellitter. I dag er dette systemer som Gallileo, GPS, Glonass, Compass. Disse systemene er forholdsvis like og svakhetene er nesten de samme.

Den siste, og muligens største, offentlige bevisstgjøringen av GNSS/GPS sine svakheter kom ved VOLPE rapporten (DOT 2001) 10. september 2001. Volpe rapporten poengterte sårbarheten til USA ved kun å benytte GPS som navigasjonssystem eller til tidssynkronisering (telekommunikasjon) uten et egnet reservesystem. Volpe-rapporten konkluderer med at risiko for tilsiktet/utilsiktet interferens av GNSS signaler kan reduseres men ikke elimineres. På grunn av GNSS-signaler generelt mottas med lav effekt kan man forholdsvis lett forstyrre (jamme) en mottager. Narring (eng.spoofting)<sup>6</sup> kan også være mulig.

#### Faktorer ved vurdering av sårbarheten til GNSS/GPS:

- GPS er og vil forbli et **100% USA eid system**. Brukere av systemet må forholde seg til en enkelt nasjons styresmakter og til en hver tid dens utenrikspolitikk. De fleste GNSS systemene er en stats eiendom (unntaket er Gallileo under utvikling av EU).
- **Solaktivitet**. Mottak av navigasjonssignalene kan bli påvirket av ekstrem stråling eller solstormer fra solen. Dette kan GNSS systemet ta høyde for ved hjelp av modeller på grunn av at solens aktivitet (måles i solflekker) har en syklus på 11 år. Solens aktivitet eller påvirkning av signaler fra solen kan modelleres. Problemer oppstår hvis det oppstår plutselige og uventede solstormer som påvirker GPS-signalet slik at mottak av GNSS signalene forstyrres.
- **Jamming, spoofing og meaconing**. Konstruktørene av GPS har prøvd å la signalenes oppbygning og struktur være av en slik type at de skal være robuste mot interferens. Det faktum at alle satellittene sender med samme frekvens gjør at jamming av systemet som helhet kan oppnås med relative enkle midler. Man kan i dag enkelt få kjøpt en GPS-jammer med utgangseffekt på 1W som vil kunne nekte tilgangen til GPS-systemet med en radius på ca.85km, se figur:3.1
- **Lokale påvirkninger** Flerveisinterferens, RFI, utilsiktet interferens o.l.
- Naturkatastrofer, rammer kontrollsenter eller annen viktig systemenhet i systemkjeden til GNSS
- Feil i satellittstyring ev. feil i navigasjonsmeldingen
- Feil i mottagerens dataprogram(ukorrekt realisering av systemspesifikasjoner)

<sup>5</sup>Global Navigation Satellite Systems

<sup>6</sup>Aktiv utsendelse av signaler fra en sender med intensjon å lure GPS mottakere til å innhente feil navigasjons data

### 3.1.2 Forbedre integriteten til GPS/GNSS

For å forbedre integriteten til GPS informasjonen er det utviklet flere metoder. Dersom det ikke er samsvar mellom en mottagers sanne ytelse og mottagerens angitte ytelse så er en del brukere avhengig av å få informasjon om dette avviket. Dette kan gjøres internt i navigasjonsenheten ved å sammenligne målinger fra overbestemte navigasjonsløsninger (RAIM<sup>7</sup>). Feilmeldingen kan også bli varslet ved hjelp eksterne kilder som f.eks region-systemer som EGNOS<sup>8</sup> og WAAS<sup>9</sup> eller lokale systemer som GBAS<sup>10</sup>. En integrasjon mellom GPS og andre navigasjonssystemer/sensorer benyttes også for å motvirke tap av PNT informasjon ved feil på GPS signalene. Systemer/sensorer som benyttes i integrasjon med GPS i dag er f.eks LoranC, treghetsnavigasjon, VOR, ILS, TRACAN o.l. Ut fra hva denne rapporten har funnet av teknisk dokumentasjon og konklusjonen i VOLPE rapporten kan det virke som det er nødvendig med et støtte/supplerende PNT-system for brukere som krever en høy grad av pålitelighet til PNT-informasjonen.

Volpe rapporten konkluderte med at den ledende kandidaten for et slikt støttesystem er det eksisterende LoranC systemet og da med spesiell tanke på den fremtidige oppgraderingen av LoranC (eLoran). Videre anbefalte Volpe at USA skulle fortsette med den pågående LoranC moderniseringen (iverksatt av FAA og USCG), frem til at man bestemte hvilket system som skulle fungere som støtte for GPS. Ble det bestemt at LoranC skulle ha denne rollen anbefalte VOLPE rapporten at DOT<sup>11</sup> skulle oppmuntre elektronikkbransjen til rask videreutvikling/forskning på ny LoranC teknologi.

## 3.2 Bruk og bruksområder for LoranC

Selv om størsteparten av Norges fiskeflåte er utstyrt med LoranC mottakere<sup>12</sup> er det GPS/GNSS som blir sett på som det primære navigasjonssystemet i det maritime miljøet. LoranC blir sett på som et sekundært eller supplerende system<sup>13</sup>. Grunnen til dette kan være en kombinasjon av GPS sin gode systemytelse, funksjonalitet og evnen til å presentere navigasjonsresultatet. GPS er i dag den ledende teknologien som er fokuset for forskning/utvikling av nye og bedre måter å presentere grafisk og/eller informativ informasjon om egen posisjon. Det kan virke som produsenter, forhandlere og brukere av navigasjonsløsninger ser på GPS/GNSS som ”det eneste navigasjonssystemet”.

Men for ansvarsfulle navigatører vil det faktum å være avhengig av kun ett enkelt system til navigering være utilstrekkelig. Dessverre viser historien at den tilsynelatende tryggheten som GPS systemet kan gi vil i noen tilfeller være en sikkerhetsrisiko. Denne sikkerhetsrisikoen lar seg først gjelde i det øyeblikket GPS informasjon er utilgjengelig

---

<sup>7</sup>Receiver Autonomous Integrity monitoring

<sup>8</sup>European Geostationary Navigation Overlay Service

<sup>9</sup>Wide Area Augmentation System

<sup>10</sup>Ground-Based Augmentation Systems

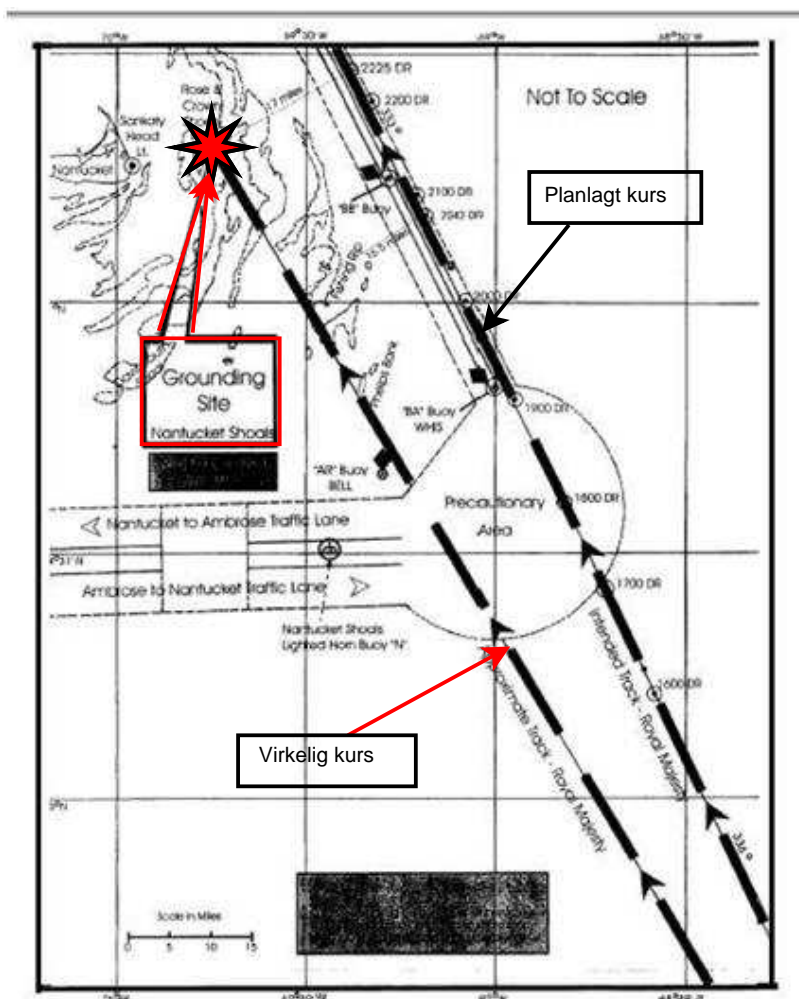
<sup>11</sup>Departement of Transportation

<sup>12</sup>Kilde, Det norske Veritas

<sup>13</sup>ref.Det Norske Veritas



og rutiner for dobbeltsjekking av posisjon mot andre GPS uavhengige systemer ikke blir fulgt. Et eksempel på en slik hendelse var når cruiseskipet Royal Majesty gikk på grunn øst for Nantucket med 1500 passasjerer ombord. Hendelsesrapportene<sup>14</sup> avslørte at GPS antennen ble separert fra antennekabelen rett etter avgang fra Bermuda og GPS enheten ytet kun bestikknavigasjon(dead-reckoning) til autopiloten. Dette medførte at avdrift fra planlagt kurs pga havstrømmer, vind o.l ikke ble registrert av autopilot. I tillegg ble ikke navigatørene klar over problemet og prosedyren som innbefattet å sjekke GPS posisjonen opp mot LoranC ikke ble fulgt. Før skipet grunnstøtte hadde de da navigert flere timer på bestikknavigasjon informasjon.(se figur:3.2)



**Figur 3-2:** Royal Majesty grunnstøtter ved Nantucket, property of <http://www.rvs.uni-bielefeld.de>

Dette er ikke en GPS systemfeil men heller en feil som kommer av overdreven tillit til systemet i tillegg til manglende rutiner eller rutiner som ikke følges.

Det er vanskelig å gi en oversikt over bruksomfanget av LoranC. Som oftest er LoranC og GPS plassert i samme området for brukeren og om informasjonen fra LoranC blir

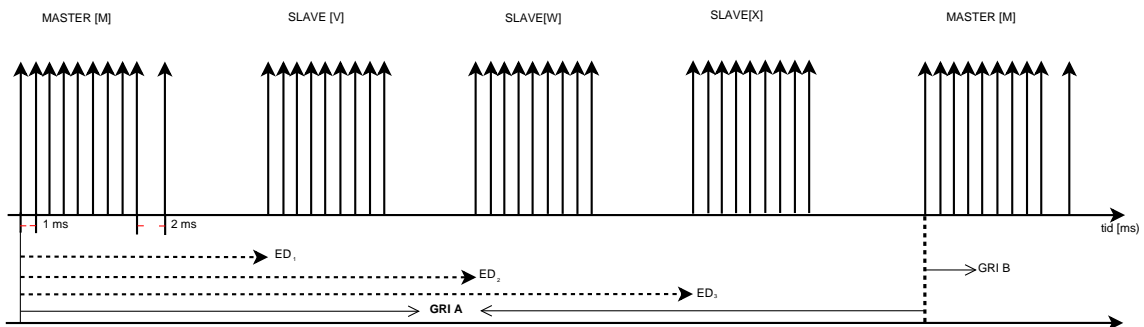
<sup>14</sup>NTSB report NTSB/MAR-97/01

brukt til navigasjon er kun den enkelte navigatør som vet. Det som kan måles er antall mottakere som selges og installeres, og ut i fra det kan man danne seg et bilde over hvor mange som har muligheten til å innhente informasjon fra LoranC. Tall fra US-Gov (USGovt 2005) indikerer et antall brukere fordelt på installasjoner på land, maritimt og i luftfart til å være ca 500.000 enheter.

# 4 Teori

## 4.1 LoranC/Eurofix

LoranC systemet består i den grunnleggende konfigurasjonen av en sammenstilling (kjede) av tre eller flere landbaserte sendere. En sender i LoranC kjeden benevnes ofte som LORSTA<sup>1</sup>. I en kjede er det en sender som fungerer som master (M) og resten av senderne vil da opptre som sekundærstasjoner. Sekundærstasjonene benevnes ved hjelp av det fonetiske alfabetet fra V(Victor) til Z(Zulu). Kjeden i Norskehavet har master-senderen i Ejde(Dk) og sekundær-sendere i Bø(No)[X], Værlandet(No)[Y] og Jan Mayen[W]. Noen sendere har bare en funksjon mens andre kan fungere som master i en kjede og sekundær i en annen. Utsendte signaler fra senderne består av en serie eller gruppe med pulser. For master er dette en gruppe med 9 pulser(der 8 er separert med 1 ms, etterfulgt av den 9ende 2 ms etter). Sekundærstasjonene transmitterer kun 8 pulser med 1 ms separasjon (se fig:4-1). Denne forskjellen i transmisjon hjelper LoranC-mottakeren til å skille mellom signaler fra master og sekundærstasjon (flere nyere mottakere skiller også master og sekundær vha fasekoding).



Figur 4-1: Transmisjons sekvens for LoranC kjede med 3 slavestasjoner

I en kjede sender master og sekundær i en spesifisert og presis tidssekvens. Først sender master, så etter et gitt tidsintervall (langt nok til at master signalet dekker dekningsområdet for kjeden), vil den første sekundærstasjonen sende, så neste. LoranC systemet ble konstruert på en slik måte at når en sekundærstasjon mottok master signalet (M) ville den vente med å sende sitt eget signal, denne "ventetiden" benevnes Coding Delay[CD]. Utbredelsestiden i rett linje(baseline) mellom stasjonene kalles "Base Line Travel Time(BTT)". Den totale tiden fra master til slave transmisjon ville da bli Emis-

<sup>1</sup>LORan STATION

sion Delay[ED]:

$$ED = t_{BTT} + CD \quad (4.1)$$

Videre vil de andre sekundærsenderne (med egen CD) sende videre i sekvensen. Tidsintervallet mellom etterfølgende transmittering fra master benevnes som "Group Repetition Intervall(GRI)", og oppgis i  $\mu\text{sek}$ . For å gi kjeden en unik identifikasjon(GRI designator) benyttes GRI-verdien dividert på 10. GRI for kjeden i norskehavet er på 79 700 $\mu\text{s}$  og GRI designator blir da GRI 7970. GRI verdien og ED blir nøye valgt ut slik at stasjonene ikke interfererer med hverandre. Problemet med overlappende pulser fra forskjellige kjeder er vanskeligere å forhindre, dette kalles CRI(Cross rate Interference) og er en av de største årsakene til interferens.

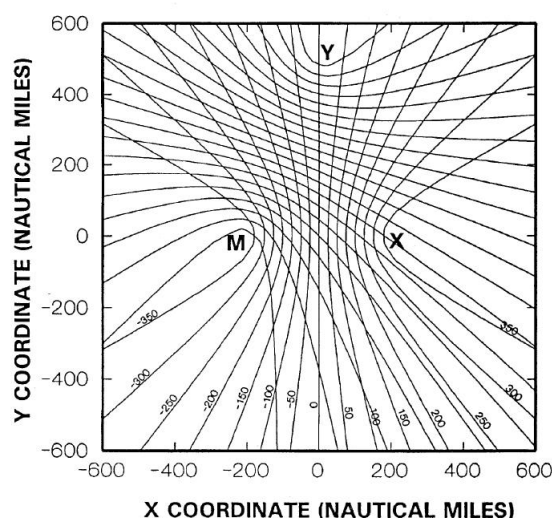
I dag blir ikke transmisjonssekvensen styrt av master, all transmisjon blir styrt av de enkelte senderens(master eller sekundær) interne cesium-atomur.

### 4.1.1 Posisjonsbestemmelse

Posisjonsbestemmelse ved hjelp av LoranC kan utføres ved hjelp av to teknikker. LoranC ble i utgangspunktet designet for at mottakeren skulle benytte tidsforskjellen mellom mottak av puls fra master og sekundær, denne tidsforskjellen benevnes som Time Difference(TD). I dag benyttes teknikken som går ut på å kalkulere posisjon ved å ta tiden signalet bruker fra sendere til mottakeren, denne teknikken benevnes Time Of Arrival(TOA).

#### Time differences (TD)

Tar man utgangspunkt i transmisjon fra to sendere med en viss avstand vil punkter mellom disse senderne med konstant avstandsforskjell danne hyperbler i et plan, disse hyperblene benevnes Line Of Position (LOP). Det samme vil også skje med tidsforskjellen mellom de transmitterte signaler fra disse senderne, se figur(4-2) (det forutsettes da at signalene utbrer seg med samme hastighet). Tidsforskjellen blir videre transformert til en avstandsforskjell, fra dette vil den todimensjonale posisjonen kunne beregnes av mottakeren.



Figur 4-2: Hyperbolsk nett bestående av LOP fra senderparene M-X og M-Y

### Time of transmission (TOT)

For TOT operasjon vil tidspunktet for transmisjonen vil bli referert til UTC standarden i stedet for å benytte SAM stasjoner. På denne måten muliggjør TOT bruk av sendere fra forskjellige LoranC kjeder for PNT. Denne teknikken benevnes ”cross-chain” og ”all-in-view”.

Bruken av ”cross-chain” og ”all-in-view” resulterer i et mer dynamisk navigasjonssystem som ikke trenger å kalkulere egen posisjon kun ut fra en enkelt LoranC kjede. Med et slikt system kan mottakeren behandle signalene fra hvilken som helst kjede som er innenfor rekkevidde. I stedet for å benytte tre sendere i en kjede vil mottakeren ha mulighet til å benytte signalene fra opptil 10 stasjoner.

### Eurofix

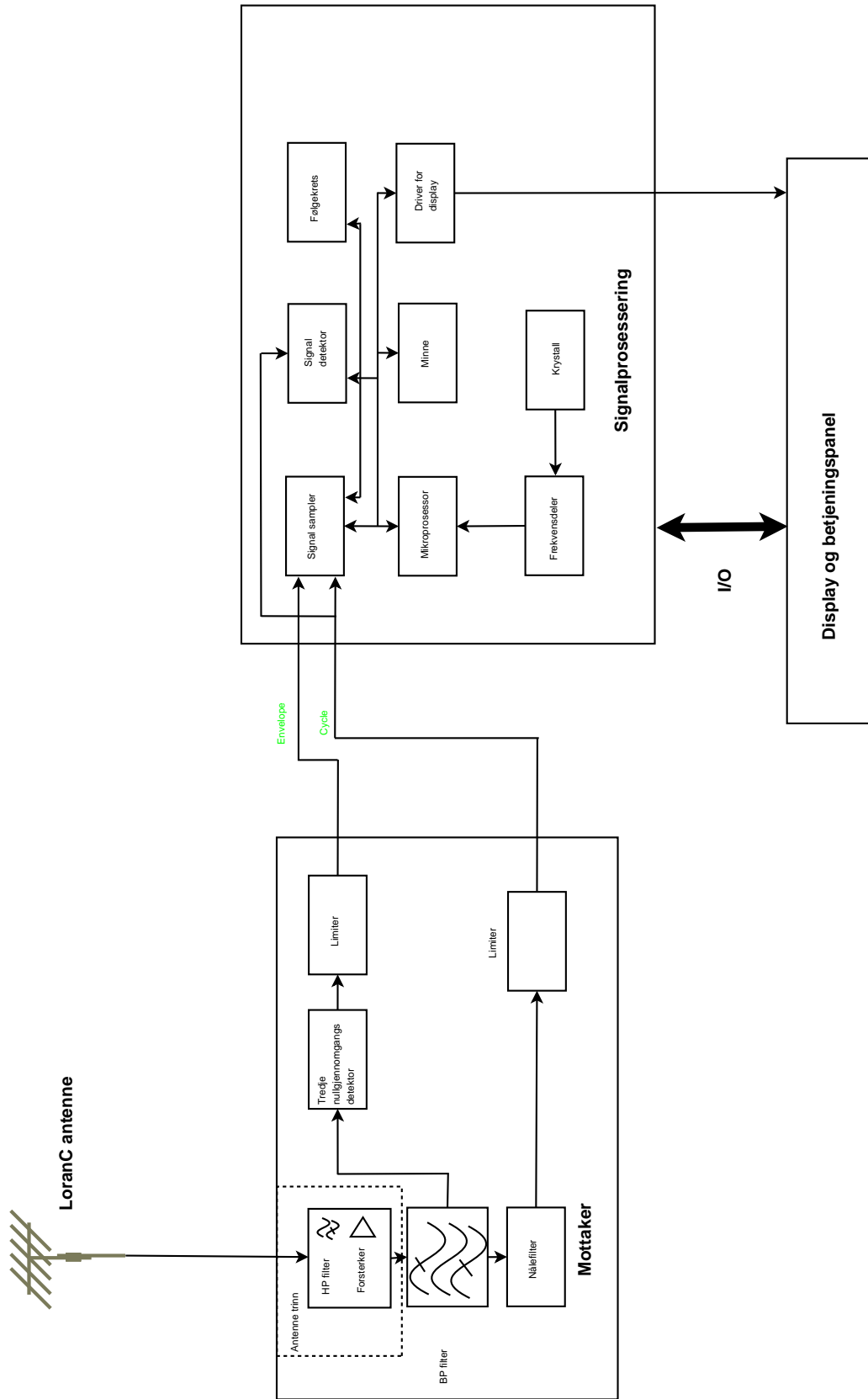
Eurofix er i utgangspunktet et system for utsendelse av differensielle GPS signaler via den tidligere NELS<sup>2</sup>-kjeden. Prinsippet med å innhente UTC<sup>3</sup> informasjon fra LoranC er som følgende: en LORSTA som er utrustet med Eurofix kringkaster UTC signal som en mottaker kan direkte innhente UTC informasjon fra. Den presise tidsangivelsen til mottatte LoranC pulser gir mottakeren en tidsreferanse, Eurofix signalet inneholder ytterligere informasjon slik at mottakeren kan kalkulere UTC-tid (UTC år, dag i året, tid og informasjon om antall leap seconds).

<sup>2</sup>Northwest European Loran-C System

<sup>3</sup>Coordinated Universal Time

## 4.2 Generell virkemåte til en LoranC mottaker

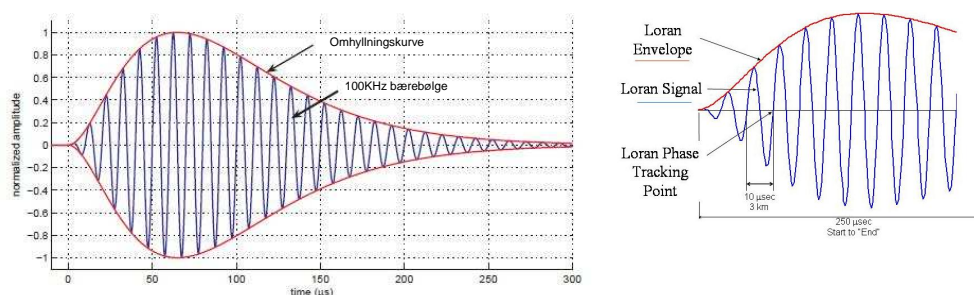
I forprosjektet (Ohren 2009) er det gitt en beskrivelse av signalstrukturen til LoranC signalet og en gjennomgang av hvilke egenskaper ved signalet en mottaker benytter til posisjonsberegning. Her gjentas i figur 4-4 signalformen til en LoranC puls i tillegg til hvor punktet for følging av pulsen befinner seg (tracking point). Dette kapitlet vil fokusere på hva i en mottaker som kan påvirkes av et jammesignal slik at det oppstår en feil i posisjonsberegningen. For å svare på; ”hva skal gjøres for å jamme en LoranC mottaker”, vil denne rapporten se på hvordan en LoranC mottaker er oppbygd (pinsipper):4-3.



Figur 4-3: Generell oppbygning av en LoranC mottaker

En godkjent LoranC mottaker (*US DOT 1992*) må som et minimum ha følgende egenskaper:

- Automatisk mottak av LoranC signaler.
- Automatisk identifisering av master- og sekundærpulser og kunne utføre sammenligning av pulsform(eng. cycle matching) av alle 8 pulser.
- Følge LoranC pulsen automatisk etter deteksjon.
- Gi informasjon om posisjon ved minimum to stk TD (to stk LOP), disse må være innenfor  $0.1\mu s$  nøyaktighet.
- For å minimisere interferens med andre signaler bør mottakeren kunne benytte nålefilter(se kap:4.2).



Figur 4-4: LoranC pulsform og følgepunkt

For eldre LoranC mottakere er det ofte nødvendig å velge hvilken kjede og stasjonspar man ønsker at mottakeren skal detektere og følge. Mer moderne mottakere har en helautomatisk deteksjon ogfølging av LORSTA<sup>4</sup> signaler. Deteksjon av LoranC signal gjøres enklest ved å detektere forkanten av pulsen ogfølging av tredje nullgjennomgang til det innmodulerte 100kHz-signalet. Følgingen innebærer oppdatering av tidsinformasjon om den tredje nullgjennomgangen for både master og sekundærsignalene. Tiden det tar for en mottaker å detektere og følge LoranC signaler er avhengig av mottakerens oppbygning og mottakerens SNR.

LoranC mottakere kan enten fungere som et enkeltstående navigasjonssystem eller i en integrasjon med andre systemer (GNSS, treghetssystemer, VOR o.l).

**Mottakerkrets** En LoranC mottaker (se figur:4-3) benytter mikroprosessorstyring med tilhørende kretser til å detektere og følge LoranC-pulser fra master- eller sekundærsendere. Vanligvis vil også mottakeren gi informasjon om forskjellen mellom mottak av master- og sekundærpulser (TD). En posisjonsangivelse fra mottakeren må som kjent bestå av minimum to slike tidsforskjeller, posisjonen beregnes ut fra kryssingen mellom de to tidsforskjellene (LOPs). Mottakerens målte TD blir som oftest konvertert til breddegrad/lengdegrad-format i mottakeren. Konverteringen inneholder også tilhørende

<sup>4</sup>LORan STAtion



ASF<sup>5</sup> korreksjon. Deteksjon, følging og sampling av signalene styres ved hjelp av IRQ<sup>6</sup> signaler i mottakeren.

**Antennetrinnet og filtrering** Antennetrinnet består av et høypassfilter og en forsterkerenhet(LNA) og skal sørge for forbehandling av LoranC signalet. På grunn av at det finnes så mange interfererende signaler nært LoranC-frekvensen er det helt avgjørende å ha god filtrering over og under LoranC frekvensbåndet. Dette favoriserer bruk av et relativt smalbandet og bratt båndpassfilter. Men et slikt filter vil kunne påvirke LoranC-pulsens forkant som igjen vil påvirke mottakerens evne til å følge LoranC pulsen(Pelgrum 2006). Utfordringen blir å utvikle et filter som fjerner interfererende signaler og som ikke påvirker forkanten eller LoranC pulsens effektivitet. Vanligvis blir signalet filtrert i et båndpassfilter fra 70kHz til 130kHz.

**Nålefilter** I forprosjektet (Ohren 2009) er det beskrevet hvordan en moderne mottaker beregner posisjon ut i fra signaler fra forskjellige LoranC kjeder (all-in-view). Bruken av signaler fra forskjellige kjeder øker også antallet synkrone eller nær-synkrone interfererende signaler. Økt andel av interfererende signaler sammen med kortere integrasjonstid gjør moderne mottakere avhengig av funksjonaliteten til disse nålefiltrene (se kap:4.3). Mottakerens nålefilter benyttes til å dempe de interfererende signalene i passbåndet (70-130kHz), filteret kan være et automatisk filter, styrt av mottakerens programvare, eller som hos eldre LoranC mottakere være manuelt og styres av operatøren av utstyret.

**Mottak og følging av signalet** Informasjon om LoranC signalets omhyllingskurve (eng.envelope) og fase vil bli splittet og sendt videre via en limiter. Signalene fra limiteren vil da være digitalisert og av en slik art at kretsen for signalbehandling kan bearbeide informasjonen.

LoranC signalet med sine 8 stk 100kHz-pulser, med varighet hver på ca  $250\mu s$ , vil i limiter bli konvertert fra analoge- til digitale-pulser, disse blir videre behandlet i signalbehandlingsmodulen. Dette pulstog vil bli lagret i skiftregistre som blir styrt av en synkroniseringspuls for hvert  $20\mu s$ . Hvert pulstog av lengde  $1000\mu s$ , vil da deles opp i et pulstog på 50bit der hver bit skiftes inn på registrene for å detektere om det er en LoranC-puls der eller ikke.

**Eksempel på tidsintervall for mottak** Ved mottak av et pulstog fra en master (ser bort fra puls nr 9) vil mottakeren sammenligne dette med enten A kodet eller B kodet<sup>7</sup> pulstog. For et komplett mottak av masterpulstog(8 pulser) i Ejde kjeden (GRI7499) vil mottakeren trenge  $7 \cdot 1000\mu s + 250\mu s = 7250\mu s$ , det vil si at det er  $67740\mu s$  ( $74990 - 7250$ ) til neste transmisjon av masterpulstog. Innenfor denne tidsforskjellen ( $67740\mu s$ )

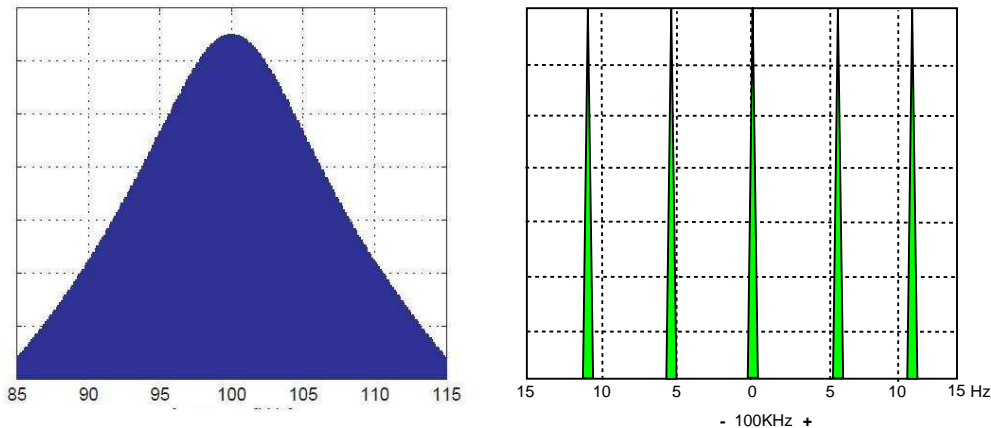
<sup>5</sup>Signalets påvirkning på grunn av utbredelse over terreng med annen ledningsevne enn ved over sjø vann

<sup>6</sup>Styresignaler internt i mottakeren, Interrupt ReQuest

<sup>7</sup>Koding av LoranC pulser, se forprosjekt (Ohren 2009)

vil det da helt sikkert oppstå/mottas et pulstog fra en sekundær LORSTA. Denne prosessen vil også utføres for neste tidsperiode (GRI).

### 4.3 Interferens med kontinuerlige signaler



**Figur 4-5:** Signalspektrum for LoranC, Ejde (GRI 9007), spektrallinjer fordelt med 5.55 Hz.

Ytelsen til en LoranC mottaker er i stor grad avhengig av gjenværende interferens/støy i frekvensbåndet til LoranC etter filtrering. På grunn av dette har produsenter av LoranC mottakere lagt stor vekt på implementere teknikker for å begrense påvirkningen av slik interferens. Måten LoranC pulsens omhyllingskurve og fase påvirkes kan være vanskelig å fastsette, men graden av påvirkning er avhengig av hvordan feltstyrken og fasen til det interfererende signalet er i forhold til 100kHz og hvor mange interfererende signaler som er tilstede. Følgesløyfen i mottakeren fungerer som et kamfilter<sup>8</sup>, der hvert passbånd er sentrert rundt en LoranC-spektrallinje. En mottakers kamfilter kan fremstilles som vist i figur:4-6, mottakerens båndbredde på følgesløyfen er vist med  $f_B$ . Eldre mottakere har en fase-integrasjonstid på minimum titalls minutter som gir en båndbredde på følgesløyfen på mindre enn 0.02 Hz, mens nyere mottakere med en kortere integrasjonstid (mellom 1 til 10 sek) vil ha en båndbredde mellom 1 og 0.1 Hz (Pelgrum 2006). Følging<sup>9</sup> av signalets kurve (eng.envelope) er midlet over en mye lengre tid (flere minutter) dette resulterer i en  $f_B$  på mindre enn 0.01 Hz.

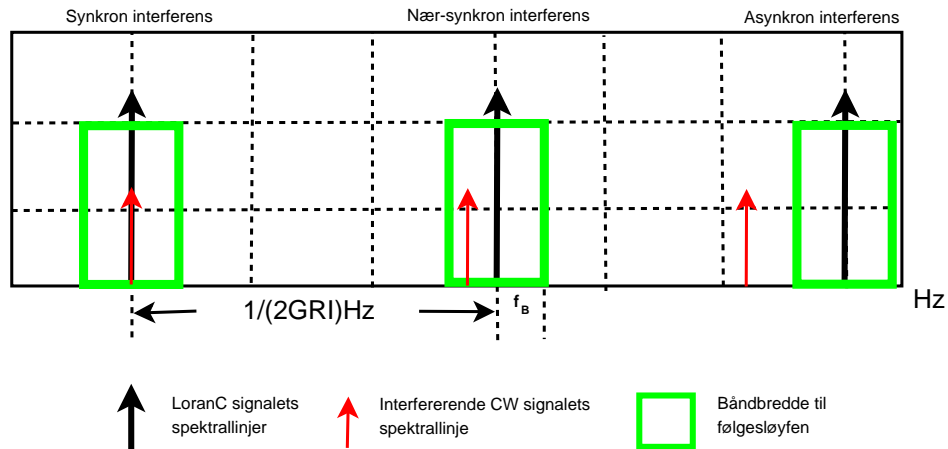
For utstyr som benyttes som LoranC mottaker gjelder MPS (Minimum Performance Standard)(for Marine Service 1977) sin definisjon på tre typer av UB-interferens, interferensen er delt opp ut fra hvordan de påvirker LoranC signalets spektrallinjer. Matematisk defineres de interfererende signalene slik:

$$\text{Synkron interferens: } \left| f_{int} - \frac{N}{2GRI} \right| = 0$$

$$\text{Asynkron interferens: } \left| f_{int} - \frac{N}{2GRI} \right| > f_B$$

<sup>8</sup>Et kamfilter multipliserer en tidsforsinket versjon av signalet med det originale signalet. Frekvensresponsen til filteret inneholder en serie med topper(spikes), ligner på tennene til en kam, derav navnet "kamfilter".

<sup>9</sup>Benyttes for detektering av LoranC puls.



**Figur 4-6:** Kamfilter gitt av følgesløyfen (sampling) i en mottaker med synkron-, asynkron- og nær-synkron interferens.

$$\text{Nær-synkron interferens: } \left| f_{int} - \frac{N}{2GRI} \right| < f_B$$

der:

$$N = 1, 2, 3 \dots$$

$f_{int}$  = Frekvensen på det interfererende signalet

$f_B$  = Følgesløyfe båndbredde i mottakeren.

### 4.3.1 Synkron interferens

Synkron interferens er de signalene som sammenfaller med spektrallinjene til LoranC signalet (figur: 4-6). Matematisk beskrives synkron interferens slik:

$$f_{int} = N \cdot \frac{1}{2GRI}, N = 1, 2, 3 \dots \quad (4.2)$$

### 4.3.2 Nær-synkron interferens

Nær-synkron interferens oppstår ved interferens som kommer innenfor frekvensbåndet til følgesløyfen  $f_B$  (figur: 4-6). Matematisk beskrives nær-synkron interferens slik:

$$f_{int} = N \cdot \frac{1}{2GRI} + \Delta f, N = 1, 2, 3 \dots, |\Delta f| < f_B \quad (4.3)$$

### 4.3.3 Asynkron interferens

Asynkron interferens er de signalene som i spekteret vil opptre utenfor følgesløyfens båndbredde (figur: 4-6).

$$f_{int} = N \cdot \frac{1}{2GRI} + \Delta f, N = 1, 2, 3, \dots, |\Delta f| > f_B \quad (4.4)$$

### 4.3.4 Effekt av UB-interferens

Synkron interferens kan gi store feil i posisjonsberegningen. I tillegg til feil i følgingen av LoranC pulsens fase kan den også legge til en likestrømskomponent til pulsens kurveform, som igjen skaper problemer med deteksjon av LoranC-pulsene. Et interferenssignal som har 0 eller 180 grader faseforskjell vil ha den største ødeleggende effekten på de mottatte LoranC signaler. Forvrengningen av kurveform i kombinasjon med feil i fasefølgingen vil da føre til forandring i målt ECD<sup>10</sup> som igjen fører til mulighet for feil ved følging av LoranC pulsens periode (eng.cycle/periodefeil).

Nær-synkron interferens vil i størst grad påvirke fasefølgingen av LoranC signalet. Følging av LoranC-kurvens form og detektering av LoranC-puls er det mindre sannsynlighet å påvirkes på grunn av den lengre integrasjonstiden og den mindre båndbredde til kamfilteret.

Asynkron interferens vil, for en lengre tidsperiode, bli fullstendig dempet på grunn av lavpass-egenskapene til følgesløyfen i mottakeren. I et kortere tidsperspektiv vil asynkron interferens øke støynivået i mottakeren (degradere mottakerens SNR).

Den vanligste måten på å dempe en slik interferens er ved bruk av nålefilter i mottakeren. Hvordan dette blir utført omhandles i kap 4.2.

## 4.4 SNR, LoranC

Signal to Noise Ratio(SNR) er forholdet mellom LoranC signalet og aktuell støy. Dekningskartene for LoranC er basert på beregninger med antatt minimum SNR på  $\frac{1}{10}$ . SNR oppgis som oftest i desibel [dB] hvor verdien beregnes ut fra følgende formel:

$$SNR = 10 \log_{10}(SNR) \quad (4.5)$$

En SNR verdi på  $\frac{1}{10}$  vil gi en desibelverdi på -10 dB. SNR må være minimum -10dB for at plott av posisjon eller at LoranC signalene skal betraktes som gyldige.

---

<sup>10</sup>Envelope to Cycle Difference

## 4.5 Bølgeutbredelse

### 4.5.1 Innledning

*”Bølgeutbredelse over en glatt sfærisk overflate er et radioelektrisk problem med en analytisk løsning.”*

En av oppgavene til denne rapporten er å beskrive og beregne bølgeutbredelsen for LoranC-signalene. Oppgaven omhandler kun jordbølgen og vil ikke omhandle den reflekterte rombølgen<sup>11</sup>.

For kalkulering av det elektriske feltet (feltstyrke) kan det benyttes to forskjellige metoder:

- Beregning ved hjelp av grafer publisert av ITU-R P.369-9. Grafene beskriver RF-bølger med forskjellig frekvens og en utbredelse over terreng med forskjellig konduktivitet og permittivitet.
- Ved hjelp av MSDOS-programmet *GRWAVE*, dette programmet er utviklet av ITU med bakgrunn i data fra ITU-R P.369-9. Feltstyrken kalkuleres i en avstand fra en sender med en homogen utbredelsesvei.

Selv om både den grafiske metoden og *GRWAVE* er metoder anerkjent av ITU har de sine begrensninger:

- De tar ikke hensyn til topografiske data.
- For bølgeutbredelse over ikke-homogen overflate vil disse metodene være utilstrekkelige.

Utbredelse av en jordbølge vil opptre i tilfeller der høyden av antennene er mye mindre enn systemets bølgelengde. Den viktigste egenskapen til jordbølgen er at den utbrer seg i en bane parallell med jordens overflate. På denne måten vil dempingen av bølgen være avhengig av overflaten som bølgen utbrer seg over.

Det utstrålte feltet fra en antenne kan uttrykkes som en sum av frekvens, egenskaper til terrenget, polarisasjon, avstand og antennens høyde. Dette er også grunnlaget for beregninger utført av *GRWAVE*.

ITU har definert to forskjellige metoder for slik feltstyrke-beregning; en metode for homogen og en metode for ikke-homogen utbredelsesvei.

*GRWAVE*-programmet beregner som nevnt demping langs en homogen utbredelsesvei. Ved en ikke-homogen utbredelsesvei kan ikke programmet benyttes og man må benytte analytiske metoder.

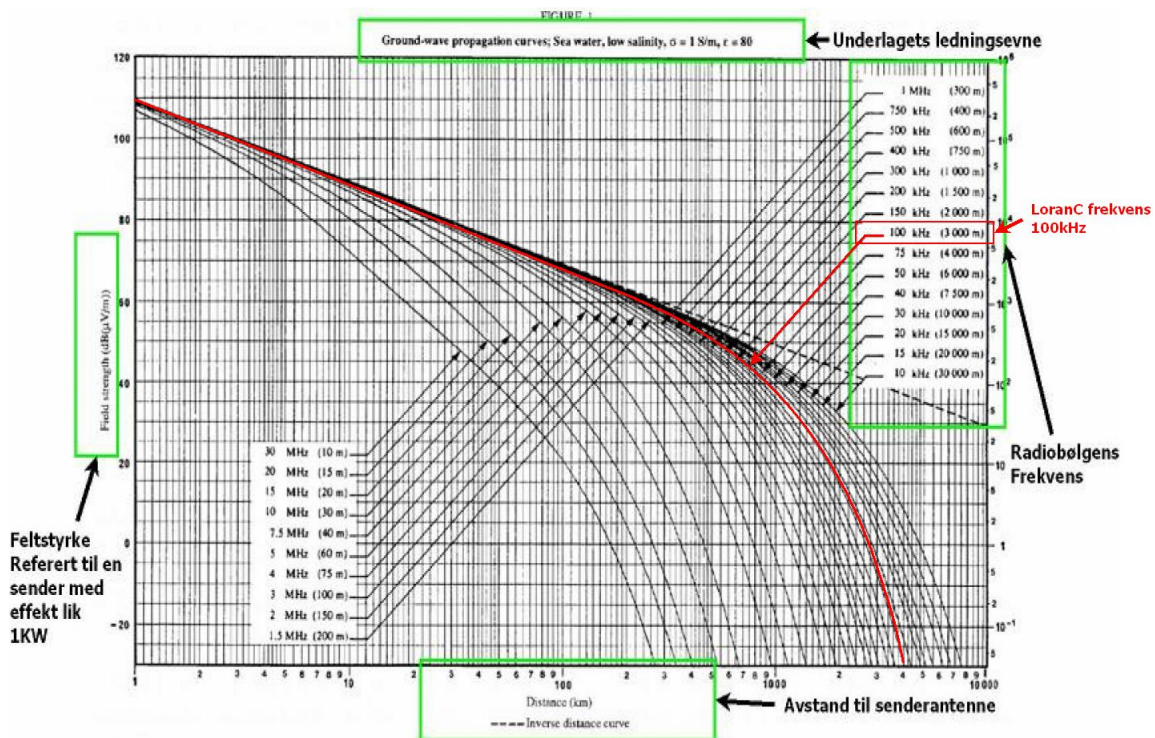
---

<sup>11</sup>eng.Skywave

**Ledningsevnen[ $\epsilon$ ]** Underlagets ledningsevne måles i siemens per meter  $\frac{S}{m}$ . ITU-R<sup>12</sup> har utarbeidet et kart som gir en oversikt over ledningsevnen til de forskjellige geografiske områdene på jorden. Denne rapporten benytter dette kartet<sup>13</sup> som grunnlag for beregning av underlagets ledningsevne.

#### 4.5.2 Kurver for jordbølgeutbredelse, ITU-R 368-9

Figur: 4-7 viser et eksempel på dempning av radiobølger som et resultat av frekvens, ledningsevnen til underlaget og avstanden til sender. For beregning av dempning for LoranC må man velge kurven for 100kHz(merket rødt i figuren).



Figur 4-7: Eksempel på graf gitt av ITU-R P.368-9

ITU opplyser at figur: 4-7 er gyldig for vertikal polariserte bølger med frekvenser mellom 10kHz og 30MHz og der antennene er over bakkehøyde. Figuren viser også at feltstyrken i en gitt avstand fra sender øker med minkende frekvens, dette gjør at LF-bølger er godt egnet for bølgeutbredelser over lange distanser.

<sup>12</sup>ITU Radiocommunication Sector

<sup>13</sup>ITU-R p.832-2

### 4.5.3 Bølgeutbredelse over en homogen overflate

ITU-R (ITU 2007) definerer en homogen overflate som en overflate som kun består av en type ledningsevne. For feltstyrkeberegninger med slike betingelser kan både programmet GRWAVE og ITU-grafer benyttes.

### 4.5.4 Bølgeutbredelse over en ikke-homogen overflate

ITU-R (ITU 2007) definerer en ikke homogen overflate som en overflate bestående av flere typer ledningsevner. Analytiske metoder må da benyttes for feltstyrkeberegninger.

### 4.5.5 Analytiske metoder

For at teknikkene som ITU baserer seg på skal være god nok må de kunne forutsi eller modellere den eksakte bølgeutbredelsen. Dette krever metoder for løsning av den elektromagnetiske bølgeligningen over ikke-homogen overflate. En slik matematisk løsning viser seg å være en nærmest umulig oppgave(ITU). Flere enklere analytiske metoder har blitt publisert og noen av de gir en god tilnærming til den matematiske komplekse løsningen. Denne oppgaven omhandler følgende analytiske teorier/metoder:

- Sommerfeld og Norton, beregning av bølgeutbredelse(Norton 1936) (Flat earth model)
- T.L Eckersleys metode, bølgeutbredelse med underlag bestående av forskjellig elektrisk ledningsevne(Eckersley 1930).
- Millingtons metode, bølgeutbredelse med underlag bestående av forskjellig elektrisk ledningsevne (G.Millington 1949).

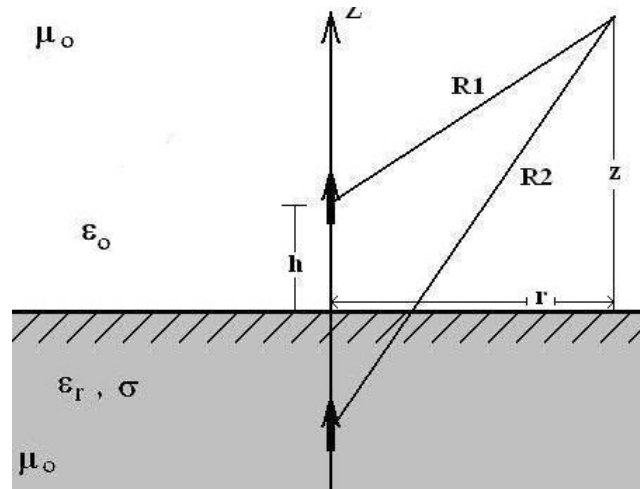
For en teoretisk gjennomgang av bølgeutbredelse benyttes alle tre teoriene, ved beregning av feltstyrker benyttes kun metodene fra Millington og Eckersley.

### 4.5.6 Sommerfeld og Norton

Den enkleste modellen for utbredelse av jordbølge kommer fra teorier utarbeidet fra Sommerfeld og Norton, disse teoriene danner også grunnlaget for de teoriene som er videre omhandlet i denne rapporten. Teoriene betrakter jordens overflate som et plan og har valgt å ekskludere de påvirkningene som skyldes jordens krumning eller underlagets ledningsevne.

Deres forskningsmål var å kartlegge feltstyrken rundt et ledende element (antenne) som befant seg over bakkenivå. Man betraktet omgivelsene rundt denne antennen som to-

delt, bestående av et fritt rom (over bakkenivå, isolerende) og et jordplan (under bakkenivå, ledende). Arnold Sommerfeld var en av de første som drev forskning på dette i løpet av årene 1909-1926, han betraktet antennen som et vertikalt element i skjæringspunktet mellom de to mediene (fritt rom og bakken). Han valgte videre å heve antennen over bakkenivå for å unngå de unødvendige komplekse matematiske beregningene (Sommerfeld 1926).



Figur 4-8: Antenne nært bakkenivå, Sommerfeld's ligning

Sommerfeld beskrev det elektromagnetiske feltet rundt antennen ved hjelp av et komplekst integral. Grunnen til at det ble et komplekst integral var bakkens ledningsevne. Er målet å finne Hertz Potensialet<sup>14</sup> i en avstand  $r$  og en høyde  $z$  over senderantennen blir den komplekse ligningen som følgende:

$$A_z = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \frac{e^{jk_0 R_1}}{R_1} - \frac{e^{jk_0 R_2}}{R_2} \right) + \frac{j2K\mu_0}{4\pi} \int_0^\infty \frac{e^{j\gamma_0(z+h)}}{K\gamma_0 - \gamma_1} J_0(\omega r) \omega d\omega \quad (4.6)$$

I 1926 kom Sommerfeld med sin "Flat-earth" teori som Norton videreutviklet for numerisk løsning i 1937. Norton beregnet påvirkningene av signalet langs utbredelsesveien og beviste at den effektive radiusen til bølgeforplantningens krumme bane var ca  $\frac{4}{3}$  av jordens radius ved standardatmosfære.

### 4.5.7 Eckersleys metode

Eckersley forutsatte at over en homogen overflate vil en radiobølges dempningen, som er en del av en ikke-homogen utbredelsesvei, være den samme som om hele utbredelsesveien var lik den homogene overflaten men med en annen utsendt effekt fra senderantennen.

<sup>14</sup>Det elektromagnetiske feltet beskrives av to reelle skalarer



Eckersleys beregninger av signaldempning benytter kurver/tabeller som grunnlag for dempning langs en flate/terreng med fast ledningsevne (homogen overflate). ITU-R P.368-9 er en publikasjon av slike dempningskurver.

Er første del av utbredelsen over sjø og den neste over land vil kurven for dempning over land følges, mens feltstyrken vil bli multiplisert med en faktor som er lik forskjellen mellom feltstyrken for land og sjø. Hvis denne forskjellen er lik 5, vil den totale dempningen følge en dempningskurve for utbredelse over land med 25 ganger høyere utsendt effekt<sup>15</sup>.

Man kan også benytte en grafisk metode, feltstyrken må da være plottet i en logaritmisk skala. Denne metoden går ut på å tegne grafer for både sjø og land, for hele utbredelsesveien, i det samme diagrammet. I eksemplet ovenfor vil grafen for sjø følges til punktet der overgangen til land er nådd, deretter vil graf for land løftes opp til dette punktet og graden av signaldempning vil videre følge grafen for bølgeforplantningen over land.

Dersom signalveien er sammensatt av 50km sjø og 70km land vil kurven for dempning over land bli parallellforskjøvet til enden av sjøtraséen. I følge med prinsippet om resiprositet skal samme feltstyrke oppnås ved mottaker selv om man byttet om sender og mottaker. Følger man 50km over sjø ( $\sigma = 5 \frac{S}{m}$ ) og 70 km over land  $3 \cdot 10^{-4} \frac{S}{m}$  så vil feltstyrken bli  $62\text{dB} \frac{\mu V}{m}$ . Mens feltstyrken vil bli  $58\text{dB} \frac{\mu V}{m}$  om en går den motsatte veien (effekt fra senderen er 1kW).

Det overnevnte eksemplet strider mot prinsippet om resiprositet, feltstyrken er ikke den samme hvis man bytter om på sender og mottaker. Denne forskjellen vil øke med økende frekvens. På grunn av ulike feltpåvirkningene omkring senderen enn ved mottakerstedet kan man vel ikke si at prinsippet om resiprositet gjelder.

### 4.5.8 Millingtons metode

Beregning av utbredelsen av radiobølger over terreng med varierende ledningsevne kan være forholdsvis komplekst. Men for å kalkulere; ASF<sup>16</sup>, signaldempning og/eller dekningskart for LoranC er beregning av signalutbredelsen nødvendig. Den mest benyttede analytiske metoden er Millingtons metode. Selv om metoden er tilsynelatende halv-empirisk<sup>17</sup> viser den seg gyldig for et bredt spekter av frekvenser og ledningsevner (Wait 1956). Metoden tar hensyn til ”etterfyllingseffekten”, etterfyllingseffekten oppstår når bølgen går fra et område med en type ledningsevne til en annen. Millington har vist (G.Millington 1949) at med bare en overgang mellom forskjellige terrengtyper og med visse antagelser, vil feltstyrken bli lik den geometriske middelverdien for de to resultatene en får ved å benytte Eckersleys metode begge retningene. Er feltstyrken i en logaritmisk skala, vil den geometriske middelverdien bli lik den aritmetiske middelverdien av desibelverdiene. Med Millingtons metode vil eksemplet i avsnittet 4.5.7 ha en

<sup>15</sup>grunnet at feltstyrke er i Volt mens effekt er  $V^2$

<sup>16</sup>Additional Secondary Factors

<sup>17</sup>Metode som til en viss grad er basert på observasjoner eller eksperimenter

total feltstyrke på  $60\text{dB} \frac{\mu\text{V}}{\text{m}}$ .

Nøyaktigheten ved bruk av Millingtons metode vil være avhengig av flere faktorer. Ettersom dette er en analytisk metode vil nøyaktigheten/usikkerheten være avhengig av hvor nøyaktig ITU-modellene blir avlest og graden av korrekt informasjon om ledningsevne og topografien til underlaget. Ut i fra tidligere eksperimenter (G.Millington 1949) er Millingtons metode funnet å være litt for pessimistisk i forhold til aktuell(målte) feltstyrkeverdier. Denne rapporten har lagt hovedvekt på Millingtons metode ved beregninger av feltstyrke.

## Bruk av Millingtons metode

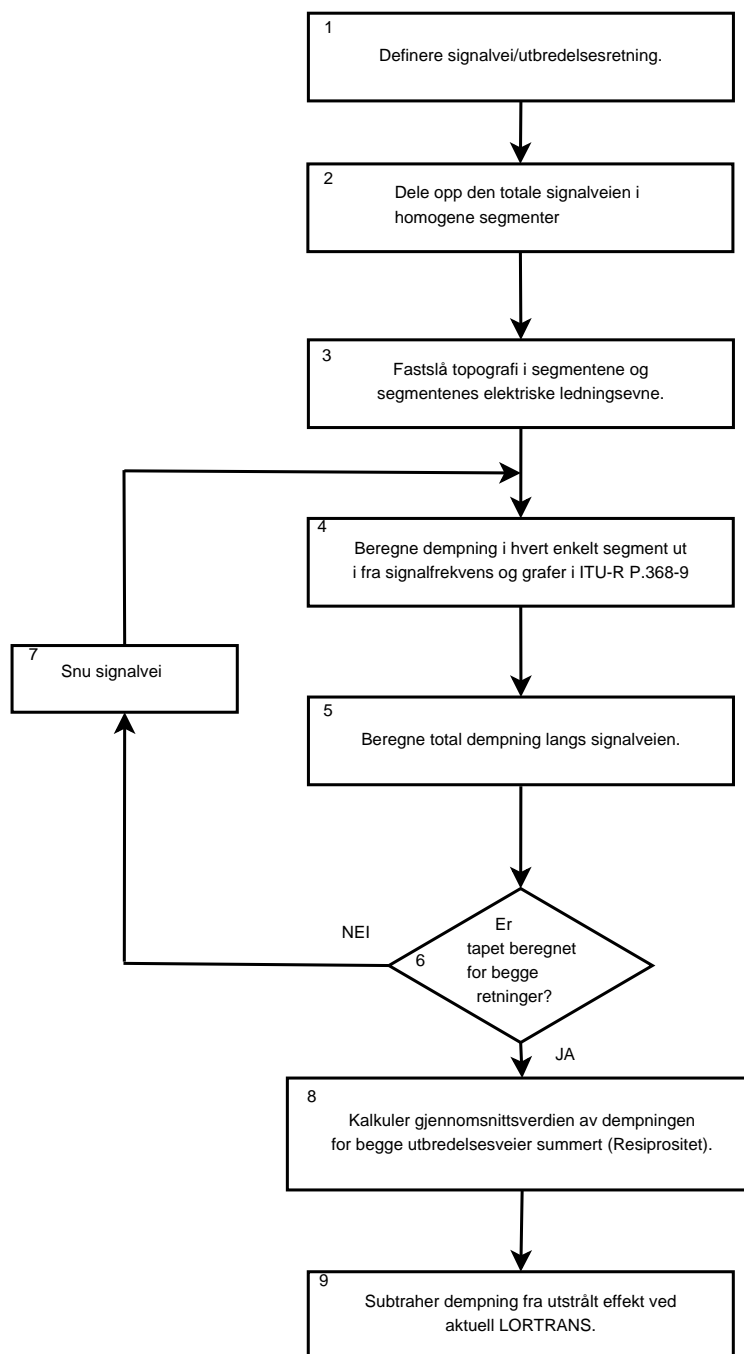
Skal man benytte matematiske beregninger vil kompleksiteten hos Millingtons metode kreve datakraft. Denne rapporten har valgt å benytte en forenklet grafisk løsning av Millingtons metode, beregningsgrunnlaget for prosedyren er grafer utarbeidet av ITU (ITU 2007). Figur 4-9 viser prosedyren som er fulgt ifm den grafiske løsningen. Flytdiagrammet er utarbeidet av denne rapporten fra prinsippene i Millingtons metode.

### Forklaring flytdiagram, figur 4-9.

1. Bestem signalvei eller retning for bølgeutbredelse fra sender til mottaker.
2. Utbredelsesveien deles opp i segmenter med homogen elektrisk ledningsevne. For en oversikt over de forskjellige ledningsevnene i Norge benyttes det i denne rapporten et oversiktskart utarbeidet av ITU<sup>18</sup>.
3. Fastslå topografien i segmentene og segmentenes elektriske lederevne ( $\sigma$ ,  $\epsilon$ ).
4. Ut fra lengden av segmentet, ledningsevnen og signalets frekvens benyttes grafer/tabeller utarbeidet av ITU-R P.367-9 for beregning av signaldempning i hvert enkelt segment.
5. Beregn total dempning langs valgt utbredelsesvei/retning (adderer dempningen i alle segmentene).
6. Er dempningen beregnet for begge signalveier gå til nr 8, hvis ikke utfør nr 7.
7. Snu signalretning, utfør videre beregninger i punkt 4 og 5 for den reverserte signalveien.
8. Adder den totale dempningen for begge utbredelsesveiene og del på 2(to). Resultatet er den totale dempningen langs utbredelsesveien.

---

<sup>18</sup>ITU-R P.832-2 World atlas of ground conductivities, Figur 16.



**Figur 4-9:** Flytdiagram Millingtons metode, utarbeidet ifm denne rapporten.

For å beregne dempningen er denne grafiske metoden en forholdsvis enkel og oversiktlig metode. I de tilfeller der signalveien består av flere ulike homogene segmenter gir metoden en meget god grafisk beskrivelse av topografiens påvirkning av signalet langs signalveien. Figur 4-10 viser et eksempel på en slik grafisk løsning av dempning der utbredelsesveien består av 4 forskjellige homogene segmenter (merket med tallene 1-4 til venstre i figuren), ledningsevnen er lik  $\sigma$  og  $\epsilon$  og segmentlengden er  $d(1-4)$ . Figuren viser en signalvei der segmentene har en økende elektrisk lederevne. Uttrykket for den

resulterende feltstyrken ved mottakeren er:

$$\begin{aligned}
 E_R &= E_1(d_1) \\
 &\quad - E_2(d_1) + E_2(d_1 + d_2) \\
 &\quad - E_3(d_1 + d_2) + E_3(d_1 + d_2 + d_3) \\
 &\quad - E_4(d_1 + d_2 + d_3) + E_4(d_1 + d_2 + d_3 + d_4)
 \end{aligned}$$

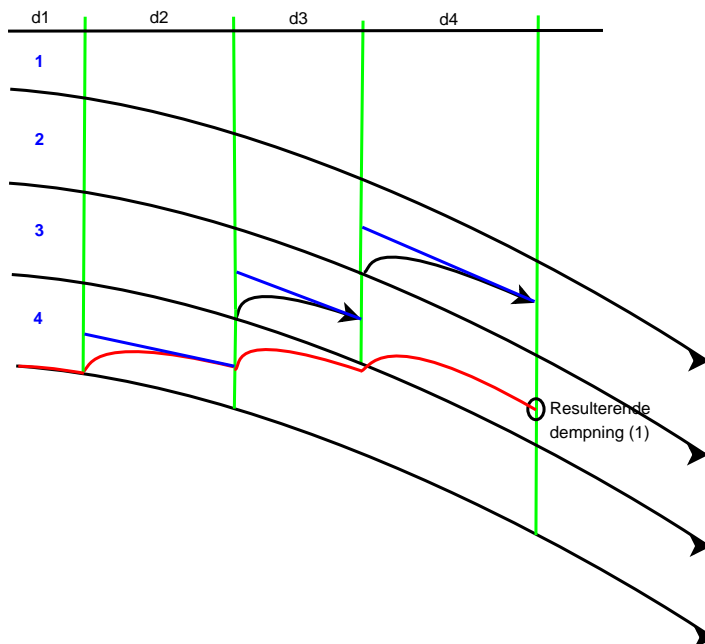
Signalveien reverseres (figur 4-11), den resulterende feltstyrken kan da uttrykkes slik:

$$\begin{aligned}
 E_T &= E_4(d_4) \\
 &\quad - E_3(d_4) + E_3(d_4 + d_3) \\
 &\quad - E_2(d_4 + d_3) + E_2(d_4 + d_3 + d_2) \\
 &\quad - E_1(d_4 + d_3 + d_2) + E_1(d_4 + d_3 + d_2 + d_1)
 \end{aligned}$$

Total feltstyrke:

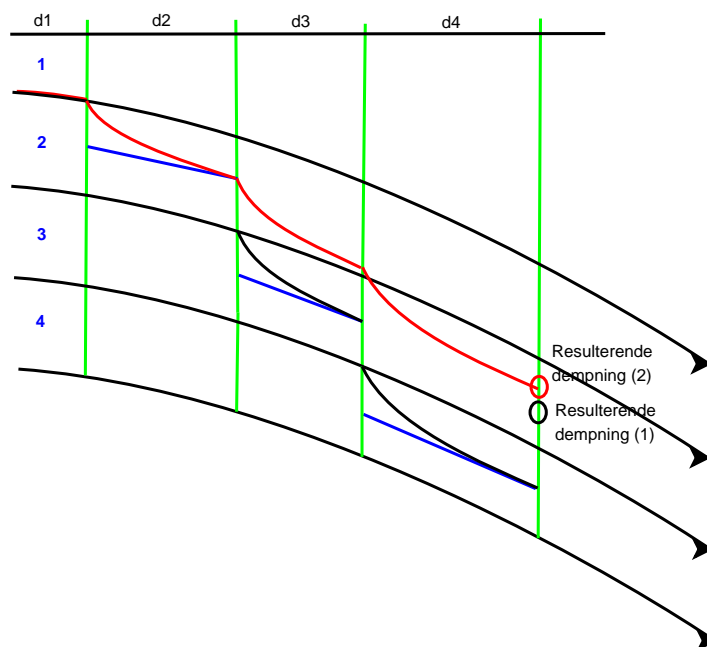
$$E_{total} = \frac{E_T + E_R}{2} \text{ (dB}\mu\text{V/m)} \quad (4.7)$$

Fra figurene 4-10 og 4-11 ser man at eksemplet i figur 4-11 gi den kraftigste feltstyrken i endepunktet. Dette tyder på at det er meget viktig med gode ledningsforhold ved senderen (godt jordingsnett)<sup>19</sup> og at det er svært viktig å ha en god ledningsevne de første kilometerne fra senderen.



**Figur 4-10:** Millington, forenklet grafisk metode, økende elektrisk ledningsevne.

<sup>19</sup>forprosjekt (Ohren 2009)



Figur 4-11: Millington, forenklet grafisk metode, avtagende elektrisk ledningsevne.

### 4.5.9 Diffraksjon

For bølgeutbredelse over en sfærisk modell av jordens overflate vil bølgen få en tilleggsdempning som følge av diffraksjon. For beregning av dempning ved frekvenser over 10MHz gir ITU-R P.526-11 en beskrivelse av hvilken fremgangsmåte som skal benyttes. For frekvenser lavere enn 10MHz, som for LoranCs 100kHz, anbefaler ITU-R P.526-11 bruk av dataprogrammet *GRWAVE*.

## 4.6 Atmosfærisk støy

Atmosfærisk støy har stor båndbredde, høye amplitudetopper(spikes) og betraktes ofte som den kraftigste bidragsyteren til støy i LoranC båndet (90-110kHz). Støyen oppstår ved elektriske utladninger i atmosfæren, fra sky-til-sky og sky-til-jord, største amplitudetoppene vil oppstå rundt 10kHz. Slike lavfrekvente bølger(LF) brer seg godt i jordens atmosfære og de kan detekteres på avstander opp til flere tusen kilometer fra nedslagsområdet. Disse elektriske utladningene er sporadiske og har en ikke-gaussisk fordeling i amplitude og i TOA(time-of-arrival). Støyen er en ikke-stasjonær prosess som introduserer flere parameter enn hva som er nødvendig ved en stasjonær prosess(mer komplekst). Ut i fra forskning (ITU) viser det seg at en matematisk beskrivelse av denne støyen med de overnevnte egenskapene vil være vanskelig. For å beskrive denne støyen best mulig benyttes det i dag modeller som er utarbeidet fra data samlet inn over lang tid og på mange steder på jorden. I 1957 startet CCIR<sup>20</sup> en 4 år lang datainnsamling av slike

<sup>20</sup>International Radio Consultative Committee

atmosfæriske støydata. Dataene som ble innhentet er i frekvensbåndet fra 10 kHz til 20 MHz. CCIR sitt mål med dette arbeidet var å yte en hjelp til beregning av dekningsområde for radiokommunikasjon. CCIR jobbet videre med datainnsamling og dette ble publisert som utgaver av CCIR 322-X. I 1992 ble CCIR slått sammen med ITU<sup>21</sup> og CCIRs versjon av 322-X ble erstattet av ITU P.372-7. I dag er det ITU publikasjonen P.372-10 som er gjeldende modell for den atmosfæriske støyen(per. mars 2010).

I tillegg til den atmosfæriske støyen og støy fra andre radiosendere vil en LoranC mottaker også bli påvirket av pulser fra andre overlappende LoranC kjeder (med en forskjellig GRI). Denne støyen kalles "Cross-Rate Interference(CRI)" og er et uheldig resultat av LoranC systemets prinsipper. CRI er meget avhengig av hvor mottakeren befinner seg i forhold til andre kjeder (geografisk plassering), dette er en dynamisk påvirkning som denne rapporten ikke vil videre omhandle eller inkludere i beregninger av støy og SNR.

#### 4.6.1 Atmosfærisk støy, CCIR 322 og ITU-R 372

Som beskrevet i forprosjekt (Ohren 2009) er lynnedslag en av de største bidragsyterne til den atmosfæriske støyen. Intensiteten til lynnedslagene varierer i intensitet både innenfor døgnet og gjennom året, CCIR har delt opp målingene av støydata i 4 sesonger og i seks 4-timers epoker. Verdiene i CCIR/ITU modellene er utarbeidet av middelverdien til denne støyen på 16 forskjellige geografiske lokasjoner innenfor frekvensbåndet 13kHz til 20 MHz.

Den eksterne støyen som ITU-R P.372 beskriver kommer fra følgende kilder (ITU 2009):

- Stråling fra lynnedslag.
- Stråling fra elektrisk maskineri, elektrisk eller elektronisk utstyr, kraftforsyning (linje nettet), eller stråling fra forbrenningsmotorer (tenning).
- Stråling fra atmosfæriske gasser og nedbør.
- Stråling fra jordens overflate eller andre hindringer innenfor antennens strålingsfelt.
- Stråling fra rommet/universet.

Målingene som ble utført var i all hovedsak målinger av antennens eksterne støyfaktor  $F_a$ .  $F_a$  er støytallet mottatt fra en tapsfri antenne der innsamlet data er utjevnet over en periode på 15 minutter. Signalet ble så mikset ned og filtrert i et 200Hz båndpassfilter. Dataene ble videre behandlet ved å ekstrapolere støydata for hele frekvensbåndet og for en vilkårlig mottakerbåndbredde. Ut i fra CCIR data fant de ut at den atmosfæriske støyen vil gjennom et kalenderår følger en lognormal fordeling. På grunn av at dataene er innhentet over flere år kunne de fastsette variasjonen til denne fordelings middelverdi. Derfor oppgir/beskriver ITU støyverdien med en tilhørende middelverdi, varians

---

<sup>21</sup>International Telecommunications Union

og standarddeviasjon for denne log-normale fordelingen.

Noen ITU-benevnelse som benyttes i ITU-R P.372-10:

- $F_a$  Det eksterne støytallet.
- $F_{am}(1MHz)$  Ved avlesning av verdenskartene i 372-10(15a-38a) er  $F_{am}$  en forventet middelvei av det atmosfæriske støytallet, ved 1MHz, i forhold til det termiske støygulvet<sup>22</sup>.
- $F_{am}(xxHz)$  Benyttes når senterfrekvensen ikke er 1MHz; figurene i 372-10(15b-38b) angir variasjonen til  $F_{am}$  som en funksjon av frekvens.
- $\sigma_{F_{am}}$  Standard deviasjonen til  $F_{am}$
- $D_u$  Øvre desil til  $F_{am}$ , verdien på den midlet støyeffekten som overgår  $F_{am}$  i 10% av måletiden (4timer).
- $\sigma_{D_u}$  Standard-deviasjonen til  $D_u$
- $E_n$  Feltstyrkeverdien (rms) til den atmosfæriske støyen som er induert i en vertikal monopol antenne over et perfekt elektrisk plan.
- $V_d$  Spenningsdeviasjonen, defineres som forholdet mellom rms envelope spenning og midlet envelope spenning uttrykt i dB.  $V_d$  gir et mål på hvor ”impulsiv” støyen er.
- $D$  RMS verdien til støyen som kommer i tillegg til  $E_n$  for å forandre hvor stor andel av tiden fra 50% til ønsket verdi, ønsket verdi i denne rapport er 5%. Antar da at fordelingen følger lognormal på begge siden av middelveien.
- $BW$  Aktuell båndbredde til mottakeren.

### Bruk av figurer og tabeller i ITU-R P.372-10 og beregning av støy.

I denne rapporten er data fra 372-10 benyttet til de teoretiske beregningene av det atmosfæriske støynivået og som et grunnlag for beregning av mottakerens SNR.

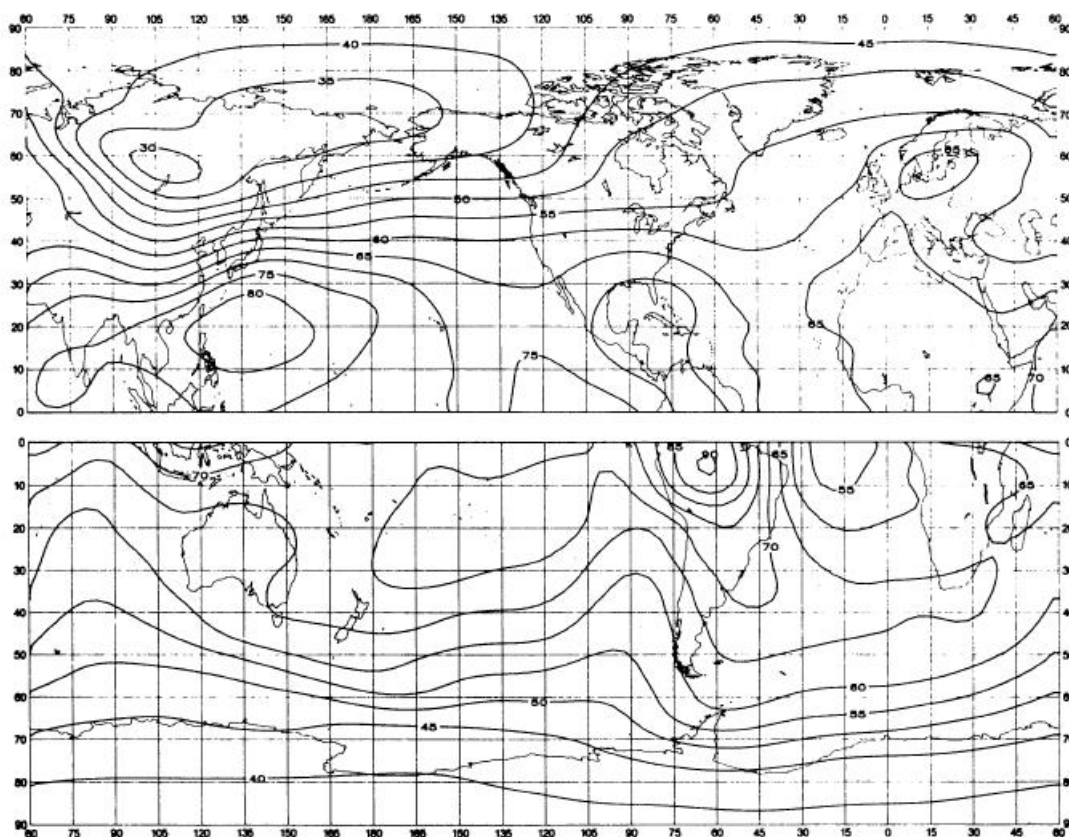
Støyens lognormale fordeling ser ut som en normalfordeling når den er plottet med logaritmiske skalaer. ITU konkluderer med at støyens rms-verdi kunne modelleres ved hjelp av to forskjellige lognormal fordelinger. En fordeling for å ta hensyn til verdiene under og en for verdiene over middelveien av rms støynivåer.

ITU benytter prefikset ”median” i sin forklaring av støynivået, denne er ut fra ”median 50% noise level”. I -372 benyttes det en forventet 50%-verdi av støynivået og en 50% kofidensialitet at ”50% støytallet” skal være lik oppgitt verdi eller lavere.

---

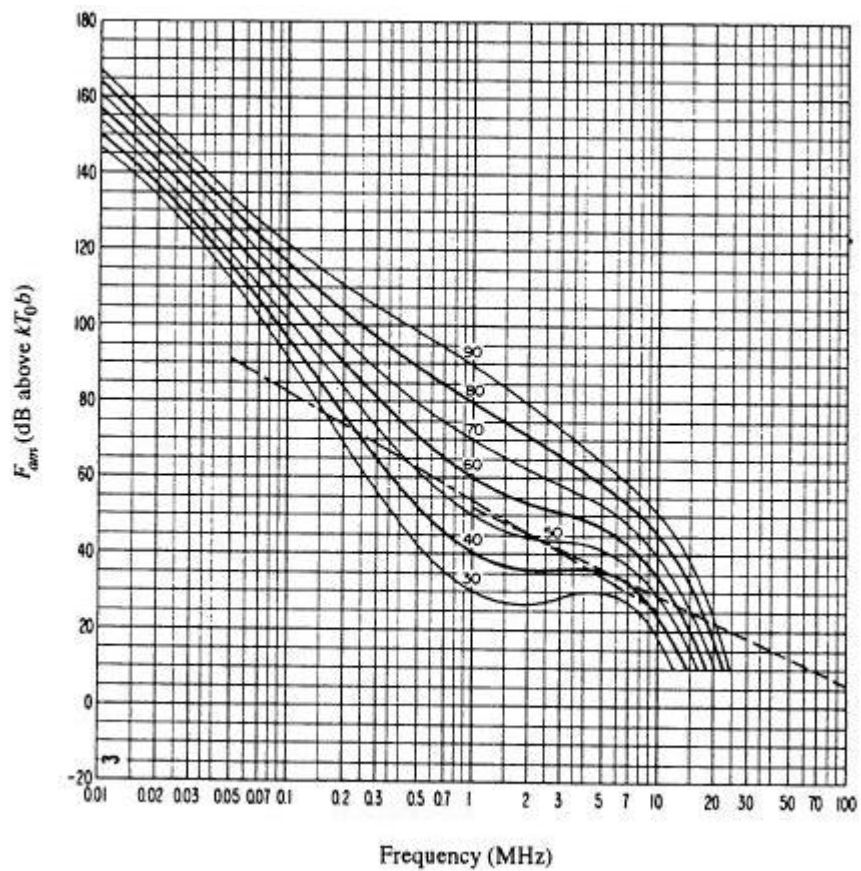
<sup>22</sup>-204 dB ved T=290K

I denne rapporten er de atmosfæriske støyverdiene avlest og beregnet på følgende måte: Figurene 4-12, 4-13 og 4-14 viser eksempler på hvordan avlesningen av 372-10 utføres. Den aktuelle verdien på  $F_{am}$  (1MHz) for ønsket årstid og tidspunkt avleses fra støykartene 15a-38a ( figur:4-12). Denne verdien angir hvilken graf man skal benytte videre for å avlese  $F_{am}$  for den ønskede frekvensen i ITU-figurene 15b-38b (figur:4-13). Variasjons parametre  $\sigma_{F_{am}}$ ,  $D_u$ ,  $\sigma_{D_u}$  etc. kan avleses av grafene i 15c-38c (figur:4-14).

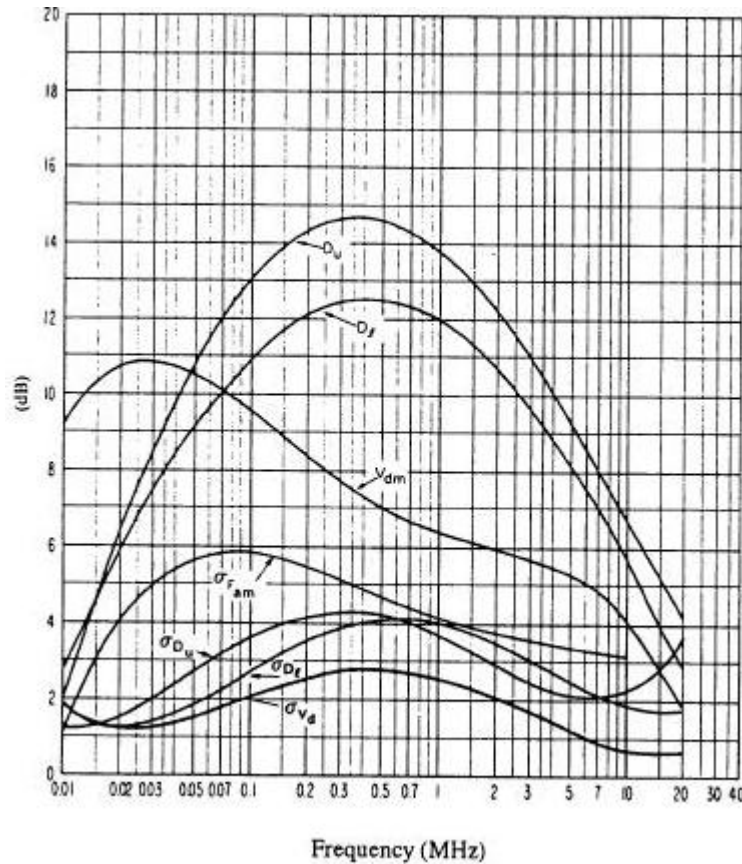


**Figur 4-12:** Expected value of atm.noise  $F_{am}$ (dB above  $kT_b$  at 1MHz).





**Figur 4-13:** Variation of radionoise with frequency



**Figur 4-14:** Data on noise variability and character

I denne rapporten er alle støyverdier beregnet ut fra Frøya, Frøyas posisjon: breddegrad 63.41°N og lengdegrad 10.25°E.

Følgende formel benyttes videre til å beregne r.m.s verdien til støyens feltstyrke (ITU 2009):

$$E_n = F_{am} + 20 \log f_{MHz} + 10 \log BW - 95.5 \text{ (dB}\mu\text{V/m)} \quad (4.8)$$

Formel 4.8 forutsetter at antennen er en kort monopolantenne med et perfekt jordingsplan og at det benyttes en lineær LoranC mottaker.

For beregning av spenningsdevisjon til støyen benyttes formel:4.9, verdien kan også avleses ved hjelp av figurene 39 og 40 (ITU-R 372-10):

$$V_d = 20 \cdot \log_{10} \frac{\text{rms envelope spenning(V)}}{\text{midlet envelope spenning(V)}} \text{ (dB)} \quad (4.9)$$

I denne rapporten blir  $V_d$  avlest med 5% intervall og en båndbredde lik 25kHz. Følgende metode benyttes til å beregne støyens forhøyede feltstyrkeverdi [N] pga 95% konfidens-

intervallet:

$$V_d = 17 \text{ (dB)} \text{ Avlest fra fig 39 og 40, ITU-R P.372-10} \quad (4.10)$$

$$N = E_n + V_d \text{ (dB}\mu\text{/m)} \quad (4.11)$$

Nedenfor vises et eksempel på en beregning av støyens feltstyrke, med et 95% konfidensintervall og en LoranC mottaker med 25kHz båndbredde. Valget av senterfrekvensen og båndbredden er det samme som hos en LoranC mottaker (avsnitt 8.2). Resultatet av denne beregningen er det man kan forvente seg av støy i LoranCs frekvensbånd.

$$F_{am1MHz} = 60 \text{ (dB)} \quad (4.12)$$

$$F_{am100kHz} = 105 \text{ (dB)} \quad (4.13)$$

$$V_d = 17 \text{ (dB)} \quad (4.14)$$

$$E_n = 105 + 20\log(0.1) + 10\log(25000) - 95.5 \quad (4.15)$$

$$= 33.5 \text{ (dB}\mu\text{/m)} \quad (4.16)$$

$$N = 33.5 + 17 \text{ (dB}\mu\text{/m)} \quad (4.17)$$

$$= 60.5 \text{ (dB}\mu\text{/m)} \quad (4.18)$$

### Kildekritikk ved bruk av informasjon gitt av ITU-R P.372-10

Selv om det er en betydelig mengde av data som er innhentet for utarbeidelse av 372-10, har denne publikasjonen også sine begrensninger. Det er kun gjennomsnittsverdien av den atmosfæriske støyen som er lagret. Det ble ikke lagret data ved f.eks lokale stormer eller uvær nært mottakeren (ITU ville ikke at antennen skulle bli utsatt for høyspent elektrisk utladning<sup>23</sup>). Dette fører til tvetydigheter angående fastsettelse av den atmosfæriske støyverdien ved en storm eller uvær. Informasjonen i 372-10 begrenses videre av hvilken type utstyr som ble brukt til datainnsamlingen. ITU oppgir at de benyttet en smalbandet mottaker med en båndbredde på 200Hz. Når en typisk LoranC mottaker har en båndbredde på 25kHz-35kHz må støyverdiene konverteres opp til en slik båndbredde. Selv om ITU oppgir grafer for en slik konvertering av båndbredder<sup>24</sup>, stilles det spørsmål med kvaliteten til denne konverteringen (kilde: LORIPP<sup>25</sup>).

### 4.6.2 Utstyr for måling av atmosfærisk støy, Frøya

For måling av den atmosfæriske støyen i denne rapporten ble de benyttet en SDR<sup>26</sup>, av typen Perseus produsert av Microtelecom. Kapittel 8.4 gir en nærmere beskrivelse av denne radioen.

<sup>23</sup>Corona discharge

<sup>24</sup>372-10. Fig 40

<sup>25</sup>Loran Integrity Performance Panel

<sup>26</sup>Software Defined Radio

## 4.7 Signaler og modulasjonstyper

### 4.7.1 Generelt om modulasjon

En elektromagnetisk bølge kan karakteriseres ved hjelp av de fire parameterene: amplitude, frekvens, fase og polarisasjon<sup>27</sup>. Er alle fire parametrene konstante betraktes bølgen som en ren tone eller en umodulert bærebølge(UB). Fra et fast punkt i rommet vil bølgens fase variere med  $2\pi ft$ , der  $f$  er frekvensen og  $t$  er tid, men fasen ut fra senderen vil alltid være fast. Varieres en eller flere av bølgens parameter kan den benyttes til informasjonsutveksling, dette kalles modulering. Bølgen vil da være en bærer av informasjon(modulasjon) derav benevnelsen bærebølge. Slike radiobølger benyttes til kommunikasjon, navigasjon, radar og mange flere applikasjoner. En slik bølge kan også benyttes til å påvirke/ødelegge mottak av informasjon, dette skjer når en mottaker (ved en frekvens) blir påvirket av et uønsket signal med samme (eller nær)frekvensen til informasjonssignalet. Ved en slik påvirkning vil mottakeren få problemer med å skille ut den riktige informasjonen. Dette kalles jamming, spoofing eller meaconing<sup>28</sup>. Denne påvirkningen kan være tilsiktet, noen prøver å blokkere eller gi feil informasjon til en mottaker, eller utilsiktet, påvirkning andre radiosendere, næringsvirksomhet, RF testing o.l.

### 4.7.2 Modulasjonstyper brukt til jamming

#### Umodulert bærebølge, UB

Ved jamming kan flere variasjoner av UB benyttes. Er den umodulerte bærebølgen av samme frekvensen, men ikke samme fase som det signalet man ønsker å påvirke (målet), kalles det ikke-koherent jamming. Er jammesignalet i fase kalles det koherent jamming.

#### Frekvenssveipet bærebølge, FSB

FSB er en UB som sveipes over et frekvensområde, derav frekvenssveipet bærebølge.

#### Amplitudemodulasjon, AM

Ved amplitudemodulasjon varieres bølgens amplitude, dette er en teknikk som benyttes til radiokringkasting, overføring av audiosignaler og lavhastighets dataoverføring. AM signalets totale båndbredde er det dobbelte av den høyeste modulasjonsfrekvensen. Graden av modulasjon kan også varieres (eng.modulation depth), den oppgis i %

---

<sup>27</sup>Retningen på e-felt vektoren.

<sup>28</sup>Mer informasjon om disse teknikkene i forprosjektet (Ohren 2009).

modulasjon. %-verdien gir forholdet mellom amplitudevariasjonen til AM signalet og amplituden til en umodulert bærebølge.

### **Frekvensmodulasjon, FM**

Ved frekvensmodulasjon varieres bølgens frekvens. Dette er en teknikk som benyttes i stor grad til høykvalitets radiokringkasting. Bærebølgens frekvens forandres i takt med amplituden og frekvensen til informasjonssignalet. Båndbredden til FM signalet bestemmes av forholdet mellom deviasjonen (hvor mye øyeblikk-frekvensen avviker fra bærebølgens frekvens) og modulasjonsfrekvensen.

## **4.8 Antenner**

### **4.8.1 Antennestørrelser**

#### **Definisjon, liten antenne**

I tilfelle der man ønsker å realisere en fysiske størrelse opp mot uttrykket ”liten” bør man ha en referanse. Den fysiske størrelsen er et subjektivt forhold som bestemmes av oppfatningen av størrelser. Liten kan være en antenne som får plass i hånden, mens en antenne på 20 meter kan betraktes som en stor antenne. I denne oppgaven er den fysiske størrelsen av antennen viktig i følge med plassering, mobilitet og det mekaniske designet, men den har kun en underordnet viktighet ifm det elektriske antennedesignet.

#### **Definisjon, elektrisk liten antenne**

Som beskrevet i forprosjektet (Ohren 2009) vil en mobil LoranC senderantenne alltid betraktes som en liten antenne (pga. LoranCs lange bølgelengde). Referansen for denne størrelsen defineres av frittromsbølgelengden til senterfrekvensen (eng. operating frequency). Bølgelengden  $\lambda$  er definert fra fysikken på følgende måte (der  $f$  er frekvens og  $c$  er lyshastigheten):

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Generelt kan man fra denne definisjonen betrakte en antenne som elektrisk liten hvis det største antenneelementet er mindre enn  $\frac{\lambda}{10}$ . For LoranC systemet vil da en liten antenne være en antenne med elementer mindre enn 300m. Fra denne definisjonen vil man definere alle antennene i LoranC systemet til å være elektrisk små.

Lavprofil brukes også til å beskrive størrelsen til en antenne. Lavprofil er et uttrykk for at antennestørrelsen er liten i forhold til objektet der antennen er påmontert. Slike objekter

kan være kjøretøyer, fartøyer, håndholdte radioer og telefoner.

### 4.8.2 Antennens reaktivefelt, fjernfelt og nærfelt

For beregninger og analyse av radiobølger er det nødvendig å definere skillene mellom antennes reaktivefelt, fjernfelt og nærfelt. I litteraturen kan man finne flere definisjoner av grenseskille mellom fjernfelt og nærfelt. Definisjonen som er benyttet i denne rapporten er:

Er målingen utført med en avstand mellom sender og mottakerantenne som er større enn  $\frac{2D^2}{\lambda}$ , der  $D$  er antennens lengste element, er det en måling i fjernfeltet. Utføres målingen med en avstand på mindre enn  $\frac{2D^2}{\lambda}$  er det en måling i nærfeltet.

Det reaktive feltet er det området i umiddelbar nærhet til antennen, området defineres slik:  $0 < r < \frac{\lambda}{2\pi}$ .

### 4.8.3 Problemer/utfordringer ved antennedesignet

Antenneteori, definering av antennens ytelse, sammenhengen mellom antennens fysiske størrelsen og ytelse er beskrevet i forprosjektet (Ohren 2009). For å videre avdekke utfordringene ved antennedesign er det viktig at man ser på det grunnleggende i oppbygningen av en antenne. En antenne er som kjent et instrument for konvertering av spenning/strøm til utstrålt energi i form av elektromagnetiske bølger. Antennes impedans vil være reell ved  $\frac{\lambda}{4}$  og vil derfor være enkel å tilpasse senderutstyr, med tanke på tilpasning vil multiplum av  $\frac{\lambda}{4}$  være den ideelle antenedimensjonen. På grunn av denne sammenhengen blir antennestørrelsen ofte benevnt som resonans-lengde eller -størrelse. Benyttes en antenne for frekvenser der antennen er elektrisk liten vil antennens inngangsimpedans bli mer reaktiv enn ved en lengde på  $\frac{\lambda}{4}$ . Økt reaktivitet vil ha en negativ virkning på overføringen av effekt mellom senderen og antennen. I tillegg vil koblingen som antennen utgjør mellom sender og medium (eter) bli dårligere. Dette fenomenet gjør til at strålingsmotstanden reduseres i antennens ekvivalentskjema (se forprosjekt (Ohren 2009) figur 2-16). En redusert strålingsimpedans vil medføre en dårligere antenneeffektivitet som vil resultere i dårligere effektivitet til transmisjonssystemet.

En monopol antenne som er mindre enn en  $\lambda/4$  vil ha følgende egenskaper:

1. Strålingsmotstand minker med antennelengden.
2. Antenneforsterkningen vil avta.
3. Antennens impedans vil ha en økt kapazitiv komponent.
4. Bakketap vil øke.

## Impedanstillpasning og systemeffektivitet

Inngangsimpedansen hos elektriske små antenner er sjelden den samme som impedansen til utstyret som antennen skal koples til. De fleste transmisjonssystemer trenger en eller annen form for tilpasning mellom antennen og senderutstyret. En god tilpasning mellom sender og antenne vil føre til en bedret systemeffektivitet og virkningsgrad. Impedanstillpasning er et forholdsvis stort og komplekst fagområdet og er tett relatert til filterteknologi. Metoden for tilpasningen kan deles opp i 4 forskjellige teknologier; smalbandet eller bredbandet, bruk av LC komponenter(eng. lumped) eller ved bruk av transmisjonslinjer.

I all hovedsak er det to hovedgrunner til å benytte impedanstillpasning;

1. Tilpasning mellom en kilde og last muliggjør best mulig overføring av effekt (minimum tap).
2. Transformere en last til en kilde slik at kilden kan yte maksimum effekt til last.

Vanligvis går tilpasning ut på å omforme/transformere en antenneimpedans til en fastsatt systemimpedans, denne systemimpedansen er normalt 50, 75 eller 300  $\Omega$ .

**Smalbandet tilpasning** I denne rapporten er ett av målene å designe en mobil jammeantenne med best mulig effektivitet/virkningsgrad. En jammeantenne som skal benyttes til å påvirke LoranC må være tilpasset til 100kHz, for lavere og høyere frekvenser vil tilpasningen degraderes. I jammeoppsettet bør tilpasningen utføre følgende; eliminere all reaktansen som lasten innfører og samtidig forandre lastresistansen til systemverdien (50 $\Omega$ ). Antenneteorien (Balanis 2005) anbefaler å benytte LC(spole og ev. kondensator) for frekvenser under 1Ghz.

### 4.8.4 Måter å forbedre egenskapene til en monopol antenne

Ut fra teori (Balanis 2005) kan man gjøre følgende for å forbedre en monopols egenskaper:

1. Gjøre monopolen tykkere, øke diameteren.
2. Øke antennens kapasitans ved å innføre top-hat.
3. Tilpasse antennens elektriske størrelse til resonansfrekvensen (multip. av  $\frac{\lambda}{4}$ ).

Tar man utgangspunkt i forbedring nr.3 i listen ovenfor kan dette gjøres på tre forskjellige måter.

- Antennen kan tilpasses bølgeresonans ved å konstruere antennen ved viklet antenneråd nok til å gjøre antennen til en  $\frac{\lambda}{4}$  antenne.

- Innføre en induktiv komponent(spole) ved antennebasen eller høyere opp på antennen, dette for å tilpasse kretsens resonansfrekvens.
- Konstruere antennen slik at hele det utstrålende elementet er bygd opp som en spole og top-mates med riktig kapasitans.

### 4.8.5 Beregninger jammeantenne

Et av målene til denne oppgaven er som kjent å gi teoretiske vurderinger og beregninger av et mulig mobilt oppsett av en LoranC-jammeenhet. Oppgavens mobilitetskrav begrenser antennes maksimale høyde til 12m.

Med bakgrunn i omhandlet teori er en **12m lang monopol med top-hat** valgt som jammeantenne i det mobile oppsettet.

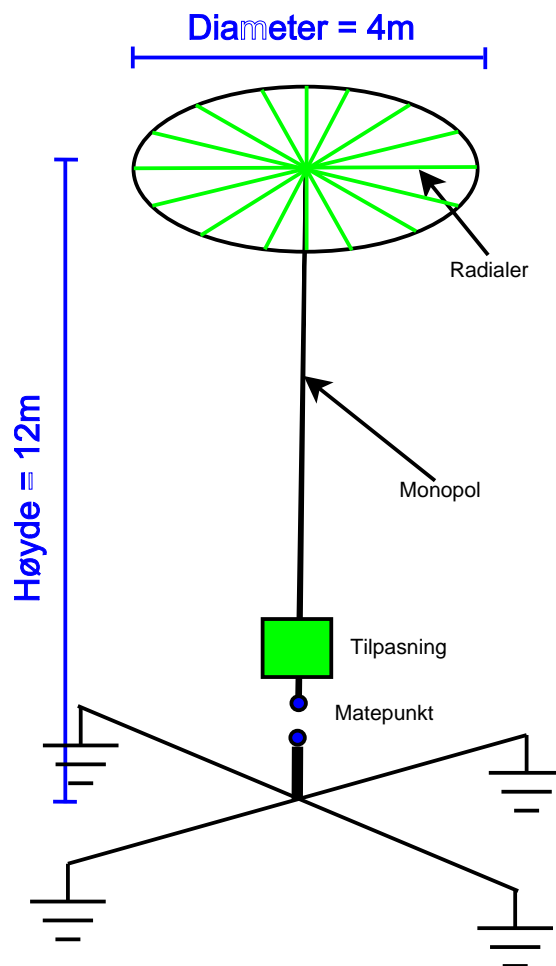
#### Konstruksjon av jammeantenne

Antennen er konstruert som en del av det komplette transmisjonssystemet der også antennens tilpasningsnettverk er inkludert. Bakgrunnen for valget av antennen og beregningsmetoden er inspirert av (LaPort 1952) og (Balanis 2005). Den endelige konstruksjonen av antennen er en 12m lang monopolantenne med en 4m top-hat bestående av 8 radielle elementer, alle antenneelementene har en diameter på 4mm (se figur: 4-15). Bruken av top-hat kan med det første se ut som et forsøk på å øke den fysiske utstrekningen av antennen, men top-hat'en vil ikke ha noen funksjon som et utstrålende element.

Bruken av top-hat'en vil øke antennens *effektive høyde*. Uten bruk av top-hat vil strømmen i toppen av antennen gå mot null slik at den øvre delen av monopolen vil ha liten eller ingen utstråling. En antennekonstruksjon med top-hat vil derimot strømmen først gå mot null i enden av top-hat'ens radielle elementer, det vil føre til at det nå går en strøm i toppen av monopolen. Denne strømmen vil føre til en forbedret utstråling i antennens øvre del.

Antennen vil ha en konisk utforming med en diameter på 300mm ved basen og 90mm i toppen. Ved 100kHz vil denne antennen ha en elektrisk lengde på  $0.004\lambda$  og vil derfor betraktes som en elektrisk-kort antenne(se kap:4.8.1).





Figur 4-15: Jammeantenne

## Jordingsnettverk

Som jordingsnettverk under senderantennen benyttes det hønsenetting med en overflate på minimum  $5m^2$ . I jammeoppsettet vil hønsenetting øke bakkens ledningsevne og samtidig samsvare godt med mobilitetskravet.

## Antennens kapasitans

Som tidligere omtalt har den valgte monopolantennen en kapasitiv impedans som kan beregnes vha antennens høyde  $[H]$  og antenne diameter  $[d]$  etter følgende formel:

$$C_v = \frac{24H}{\log \frac{1.15 \cdot H}{d}} \quad (4.19)$$

## Strålingsmotstand/effektiv høyde på antennen

Er senderenheten tilpasset strålingsmotstanden så vil ikke motstanden i prinsippet ha noen innvirkning på utstrålt energi. Men strålingsmotstanden er ikke den eneste motstanden som mottar effekt fra senderenheten, det finnes også tapsmotstander i kretsen. Tapene oppstår i selve antennen (+ tilpasningsnettverket) og i miljøet rundt antennen (bakken, objekter nær antennen o.l). I HF-båndet kan disse tapene neglisjeres på grunn av at de er mye mindre enn strålingsmotstanden, men for LF må man ta hensyn til disse tapene. De fleste mobile LF-antenner (radioamatørfeltet) har en strålingsmotstand mellom ca  $10m\Omega$  og noen få hundretalls  $m\Omega$ , den samlede tapsmotstanden for transmissjonssystemet vil være fra 30 til  $150\Omega$ . Dette medfører at 99% til 99.99% av effekten fra senderenheten ikke utstråles av antennen, men absorberes i tapsmotstandene.

En måte å beregne antennens strålingsmotstand er å måle feltstyrken og inngangsspenningen på antennerterminalene. Dette gjøres ved å sammenligne den utstrålte feltstyrken fra antennen med en standardisert verdi. Denne rapporten benytter en ITU-standardisert verdi (ITU 2007). ITU definerer denne verdien slik; feltstyrken fra en 1KW sender med en avstand på 1Km er  $300 \frac{mW}{m}$  (ligning 4.20). Antennens utsendte effekt kan da beregnes ved å sammenligne målt antennefeltstyrke i en avstand på 1Km med denne ITU-verdien (ligning 4.21).

Strålingsmotstanden  $[R_s]$  beregnes vha feltstyrkemålinger og målt antennestrøm  $[I]$  slik:

$$E_{1Kw} = \frac{30}{\text{Avstand til LORSTA}} \sqrt{\frac{P_{rad}}{10}} \frac{V}{M} \quad (4.20)$$

$$P_{rad} = \left[ \frac{E_{measured}}{E_{1Kw}} \right]^2 \cdot 1000 \text{ W} \quad (4.21)$$

$$R_s = \frac{P_{rad}}{I^2} \quad (4.22)$$

Det er også en sammenheng mellom antennens effektive høyde og strålingsmotstanden. Antennens effektive høyde er i følge (Balanis 2005) definert slik:

*”Effektiv høyde er høyden av en ekvivalent antenne med en strømfordeling som tilsvarer antennens basestrøm, og som utstråler den samme feltstyrken.”*

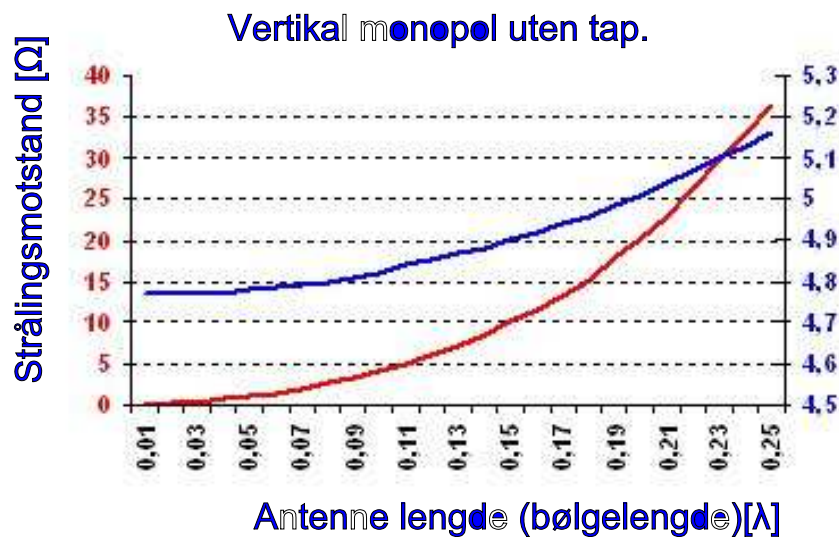
Små vertikale antenner uten top-hat vil som oftest ha en triangulær strømfordeling, da vil den maksimale strømmen være ved antennerterminalene og vil avta utover i antennen, på toppen av antennen vil det ikke gå noen strøm ( $I=0$ ). I et slikt tilfelle vil den effektive høyden av antennen være lik halve av den fysiske lengden. Den valgte top-hat monopolantennen vil ha en mellomting mellom en triangulær og uniform strømfordeling. På grunn av denne strømfordelingen vil antennens effektive høyde bli noe lengre.

Antennens effektive høyde kan beregnes ut fra målinger av utstrålt feltstyrke  $[E]$  og spenningen på antenneinngangen  $[v]$ (se 4.23).

$$h_e = \frac{v}{E}(\text{m}) \quad (4.23)$$

Den effektive høyden kan videre benyttes til beregning av strålingsmotstanden. (Ohren 2009) viser at følgende formel kan benyttes(se også rød graf i figur:4-16):

$$R_s = 40\pi^2 \cdot \left[ \frac{h_e}{\lambda} \right]^2 \quad (4.24)$$



Figur 4-16: Strålingsmotstand som funksjon av antennens lengde

#### 4.8.6 Beregning av valgt monopolantenne, monopol antenne med top-hat

For valgt antenne uten top-hat beregnes effektivitet  $[\eta]$  slik:

- Antennens lengde er lik  $0.004\lambda$
- Bakke tap =  $10\Omega$
- Tap i tilpasnings spole =  $28\Omega$  (formel:4.31)

$$R_s = 40\pi^2 \cdot (0.004)^2 = 6.32m\Omega \quad (4.25)$$

$$\eta = \frac{6.32m\Omega}{6.32m\Omega + 10\Omega + 28\Omega} \cdot 100\% \quad (4.26)$$

$$\eta = 0.016\% = -37.8\text{dB}(\text{Effektivitet}) \quad (4.27)$$

Antennens kapasitive vektor kan beregnes etter følgende formel:

( $[H]$  antennehøyde[m],  $[d]$  antennediameter[m])

$$C_v = \frac{24 \cdot 12m}{\log \frac{1.15 \cdot 12m}{0.004m}} = 63.5pF \quad (4.28)$$

Antennens kapasitive vektor er beregnet til **63.5**[pF] (formel:4.28).

Effektivitetsberegningene viser at antennens effektivitet bør forbedres. En måte å øke effektiviteten er å øke antennens strålingsmotstand. Ettersom antennens strålingsmotstand er proporsjonal med kvadratet av strømmen i antennen kan en økning av strålingsmotstanden muliggjøres ved å forbedre strømfordelingen. For en vertikal monopol vil middelverdien av antennestrømmen være lik 50% av inngangstrømmen. En måte å forbedre strømfordelingen på er å innføre en kapasitiv top-hat. Strømfordelingen i antennen vil fremdeles avta lineært men gjennomsnittverdien av strømmen i den vertikale antennen vil være høyere på grunn av at minimum strøm vil nå være i enden av top hat'en.

Kapasitansen til en av de 8 radielle elementene beregnes etter følgende formel:

( $L$  er lengden av de radielle elementene og  $d$  er diameteren,  $H$  er antennehøyden)

$$C_H = \frac{24 \cdot L}{\log \left( \frac{4 \cdot H}{d} \right)} = 19pF \quad (4.29)$$

Kapasitansen til de 8 radielle horisontale antenneelementene kapasitans er  $C_H = 152pF$

Summen av den horisontale og vertikale kapasitansen utgjør antennens totale kapasitans:  $C_t = 152pF + 63.5pf = 215.5pF$ .

Beregning av antennens totale reaktans:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C_t} = 7400\Omega \quad (4.30)$$

For å bedre antennens totale effektivitet må antennens reaktans kunne tilpasses systemimpedansen. Med bakgrunn i omhandlet teori benyttes det en spole (loading coil) for å tilpasse antennens kapasitive vektor. Rapporten tar utgangspunkt i en spole med  $Q_l = 300$ . Spolen vil tilpasse antenne og sender men den vil også innføre en tapsmotstand i kretsen.

Beregning av tilpasningens (spolens) tapsmotstand:

$$R_l = \frac{X_l}{Q_l} = \frac{7400}{300} = 24.6\Omega \quad (4.31)$$

Rapporten antar tapsmotstanden til antennens underlag med jordingsnettverk (se kap4.8.5) å være  $10\Omega$ .

Strømmen i toppen av antennens vertikale del vil være avhengig av forholdet mellom  $C_H$  og  $C_V$  (forutsetter at lik mengde strøm absorberes i hver  $pF$  kapasitans). Beregning av strømmen i antennen øvre del:

$$I_T = \frac{C_H}{C_H + C_V} \cdot I_0 \quad (4.32)$$

Beregning av strømmens gjennomsnittsverdi i den vertikale antennen etter innføring av top-hat:

$$I_A = \frac{I_T + I_0}{2} = \frac{2 \cdot C_H + C_V}{2 \cdot (C_H + C_V)} \cdot I_0 \quad (4.33)$$

Benyttes resultatet av strømmens gjennomsnittsverdi kan strålingsmotstanden uttrykkes på denne måten:

$$R_s(\text{tophat}) = \frac{40\pi^2 \cdot \left[ \frac{2C_H + C_V}{C_H + C_V} \right]^2 \cdot H^2}{\lambda^2} \quad (4.34)$$

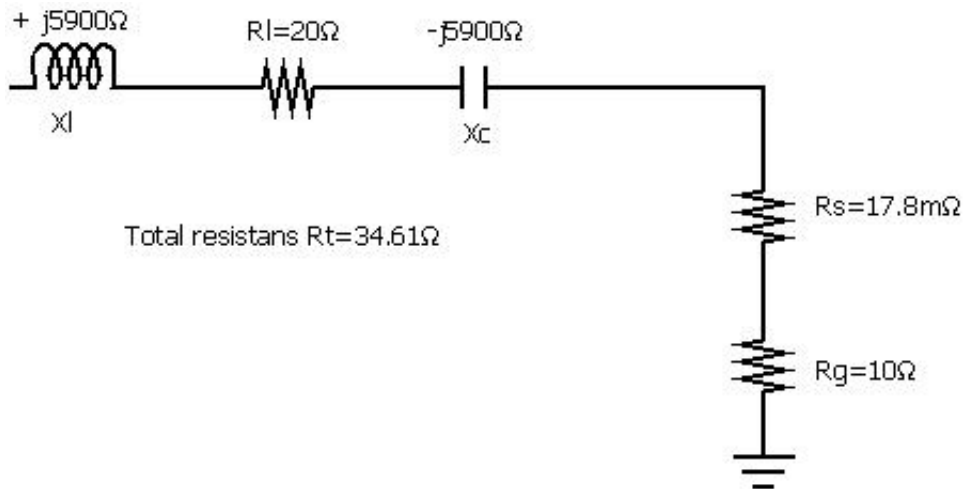
For valgt antenne beregnes strålingsmotstanden og effektiviteten slik:

$$R_s = 17.81m\Omega \quad (4.35)$$

$$\eta = \frac{17.81m\Omega}{17.81m\Omega + 10\Omega + 20\Omega} \cdot 100\% \quad (4.36)$$

$$\eta = 0.06\% = -32.3\text{dB}(\text{Effektivitet}) \quad (4.37)$$

Ekvivalentskjema for monopolantennen:



Figur 4-17: Ekvivalent skjema for valgt antenne

Innføringen av en top-hat vil forbedre antennens effektivitet med ca 5 dB. Denne antennen med antennehøyde på 12m, elementdiameter 4 mm, top-hat med 8 stk radielle elementer, top-hat diameter 4m og senterfrekvens på 100kHz vil ha en beregnet effektivitet på 0.06%.

Tabell 4.1 viser den valgte monopolantennens egenskaper sammenlignet med en eksisterende LoranC senderantenne<sup>29</sup>. Tabellen viser viktigheten av å ha en fysisk lang antenne for å oppnå god effektivitet ved transmisjon av LF. Formel 4.34 viser også denne sammenhengen der strålingsmotstanden er proporsjonal med kvadratet av antennens høyde  $H^2$ . Tabellen viser også at bruk av elektrisk små antenner så vil reaktansen og tapsmotstanden øke. For en gitt antennestrøm vil også spenningen være høyere, som igjen resulterer til et mer intenst felt rundt antennen. Feltintensiteten vil bli forsterket på grunn av at antennene er nærmere bakkenivå og med lik strøm vil intensiteten ved bakkenivå for små antenner være dobbelt så høy som hos konvensjonelle LORSTA antenner.

Tabell 4.1: Sammenligning av senderantenner

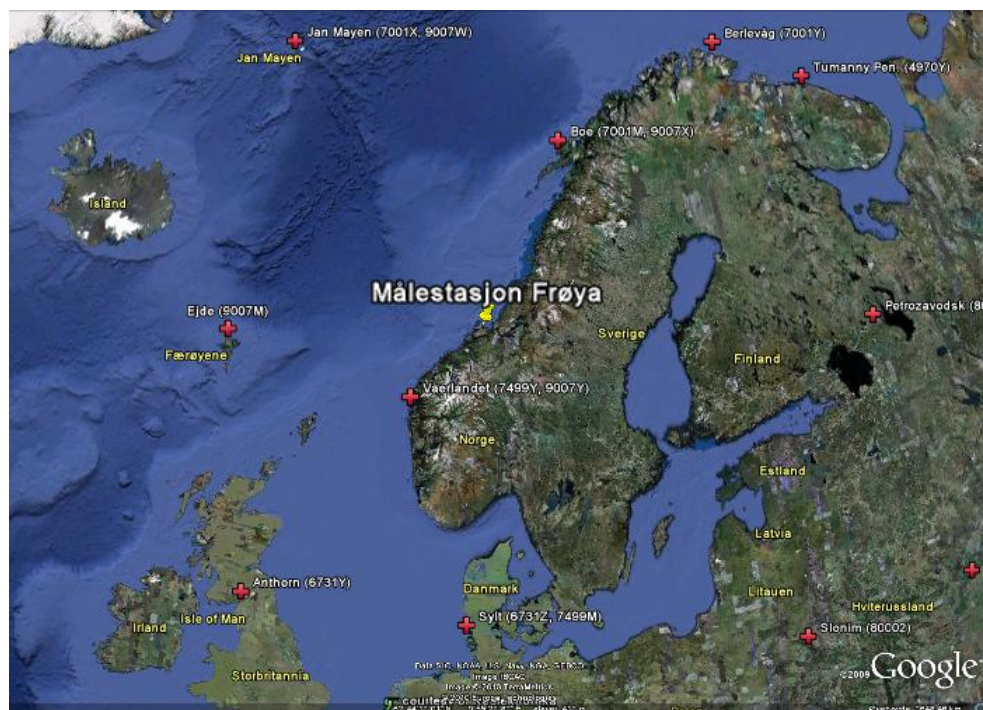
Antenne Type	Høyde m	$R_s$ mΩ	Tap Ω	Kapasitans pF	Reaktans Ω	Effektivitet % $\eta$
Top hat monopol	9	11	40	257.5	6180	0,027
Top hat monopol (Valgt antenne)	12	17.81	30	269.7	5900	0,06
LoranC antenne	220	>1000	< 3	>1600	< 1000	20 til 90

<sup>29</sup>Data om LoranC antenne henter fra Radionavigation Bulletin. Issue 38 USCG

# 5 Resultat av teoretiske betraktninger av signalstyrker

## 5.1 Bølgeforsplantning og signalstyrke LoranC signaler

Målingene i denne rapporten ble utført på Frøya, nærmere bestemt ved Sistranda. Ut i fra at Frøya ligger i åpent hav er øya i utgangspunktet et godt egnet sted for mottak av LoranC signaler (se figur:5-1 og 5-2).



Figur 5-1: Kart som viser Frøya og LoranC sendere

Figur 5-1 viser lokasjon for LORSTA sendere og 4 sendere i det russiske navigasjonssystemet CHAYKA. Selv om signalene fra LoranC og CHAYKA er tilgjengelige er det kun signaler fra LoranC som benyttes i denne rapporten.





Figur 5-2: Kart som viser Frøyas beliggenhet

Beregning av avstanden mellom LORSTA og målestasjonen er basert på avstandsmåler i programmet Google Earth™ (se tabell:5.2). Signalveiens topografi er også basert på informasjon fra Google Earth. Denne rapporten har valgt å dele signalveiens topografi inn i tre typer<sup>1</sup>; sjø  $\sigma = 5 \frac{S}{m}$ ,  $\epsilon = 70$ , tørt land  $\sigma = 3 * 10^{-4} \frac{S}{m}$ ,  $\epsilon = 7$  og fjell  $\sigma = 10^{-4} \frac{S}{m}$ ,  $\epsilon = 3$ . For beregning av signaltap langs signalveien benyttes det dempningsgrafer (ITU 2007) sammen med utstrålt effekt fra LORSTA (se tabell:5.1).

Følgende LoranC kjeder kunne mottas fra målestasjonen:

- Loran kjede 7001(M,X,Y) Bø, Jan Mayen, Berlevåg.
- Loran kjede 7499(M,X,Y) Sylt, Lessay, Værlandet
- Loran kjede 9007(M,W,X,Y) Ejde, Jan Mayen, Bø, Værlandet.

<sup>1</sup>Definert av ITU



**Tabell 5.1:** Utstrålt effekt fra aktuelle Lorsta

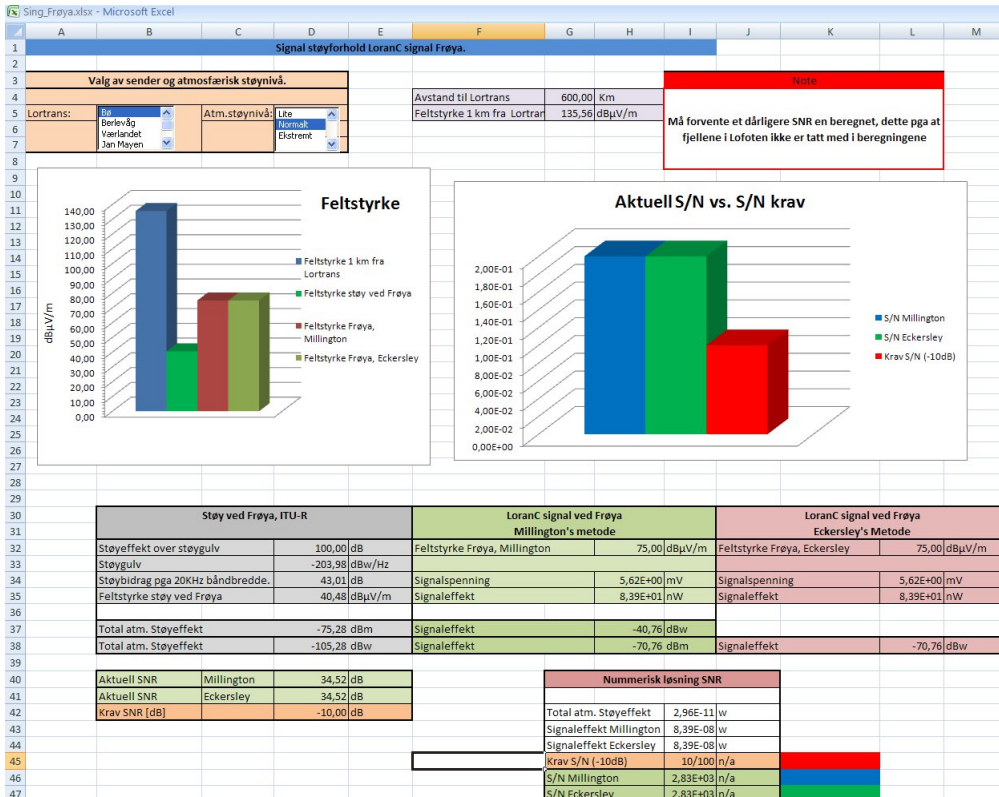
<b>Lorsta</b>	<b>Radiated PWR [KW]</b>	<b>Radiated PWR 1Km [db]</b>
<b>Bø</b>	400	135,56
<b>Berlevåg</b>	250	133,52
<b>Værlandet</b>	250	133,52
<b>Jan Mayen</b>	250	133,52
<b>Ejde</b>	400	135,56
<b>Sylt</b>	250	133,52

**Tabell 5.2:** Avstand fra Lorsta til Frøya

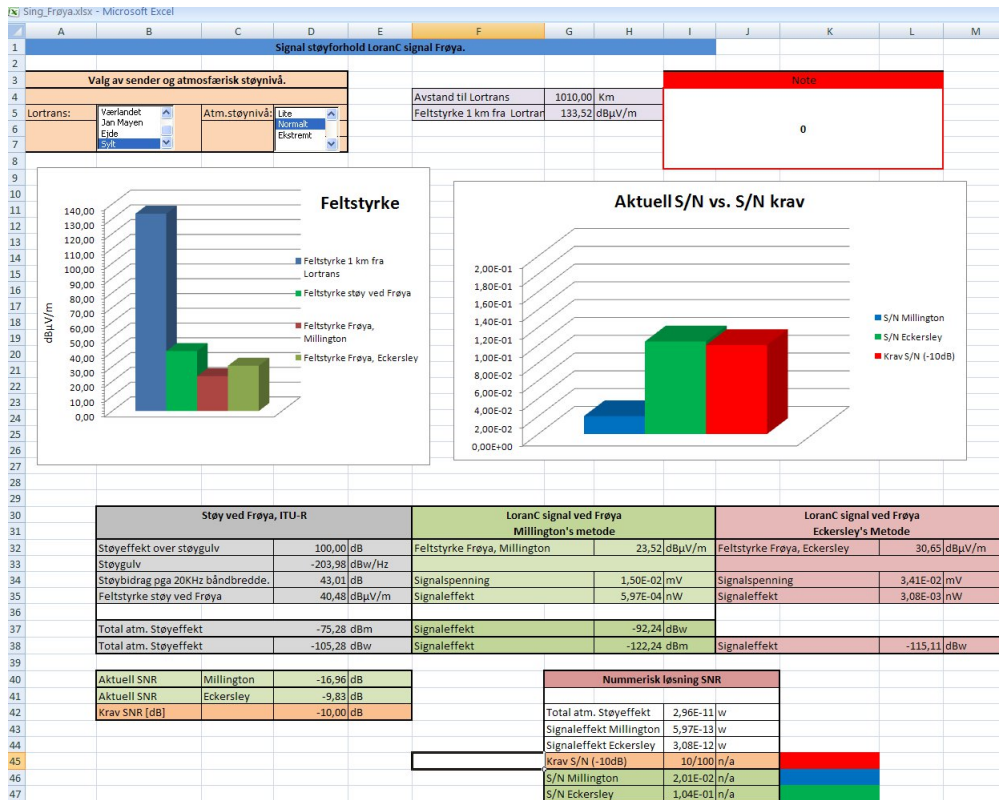
	<b>Frøya [km]</b>
Bø	600
Berlevåg	1170
Værlandet	340
Jan Mayen	1090
Ejde	820
Sylt	1010

### 5.1.1 Beregning av signalnivåer ved hjelp av Excel-program

Det er utviklet et regneark (Excel fil: Frøya.xls) som kalkulerer LoranC-feltstyrke og SNR ved Frøya fra valgt LORSTA og atmosfærisk støynivå ( figur:5-3, figur:5-4). Excelarkets søylediagram viser LoranC-signalstyrken ved Frøya, den beregnede signalstyrken av metoder fra Millington og Eckersley og det minimale LoranC-SNR for mot-tak av LoranC signaler(USCG, se kap:4.4). Atmosfæriskstøy kan videre velges ut fra tre nivåer; *lite*, *normalt* og *ekstremt* med støynivå på henholdsvis 90, 100 og 110 dB over det termiske støygulvet(-204dB). Dette er støyverdier utarbeidet for Frøya av ITU (ITU 2009), se kap:4.6.



Figur 5-3: Beregning av Loranc signal fra Lorsta Bø



Figur 5-4: Beregning av Loranc signal fra Lorsta Sylt

## 5.1.2 Resultat av signalberegninger

Ut fra beregningene vil følgende LoranC signalverdier forventes ved målestasjonen på Frøya (se tabell:5.3):

**Tabell 5.3:** Beregnet signalverdier fra aktuelle LORSTA

<b>LORSTA</b>	<b>Millingtons metode</b>	<b>Eckersley's Metode</b>
<b>Bø - Frøya</b>	75,00 <i>dBμV/m</i>	75,00 <i>dBμV/m</i>
<b>Berlevåg - Frøya</b>	27,77 <i>dBμV/m</i>	22,16 <i>dBμV/m</i>
<b>Værlandet - Frøya</b>	51,27 <i>dBμV/m</i>	56,64 <i>dBμV/m</i>
<b>Jan Mayen - Frøya</b>	59,77 <i>dBμV/m</i>	59,77 <i>dBμV/m</i>
<b>Ejde - Frøya</b>	68,29 <i>dBμV/m</i>	68,29 <i>dBμV/m</i>
<b>Sylt - Frøya</b>	23,52 <i>dBμV/m</i>	30,65 <i>dBμV/m</i>

Ut fra de tidligere beregningene av feltstyrke (tabell:5.3), ITU-støydata (tabell:6.1), LORSTA sendereffekt (tabell:5.1) og avstanden mellom LORSTA og målestasjonen på Frøya (tabell:5.2); er beregnet SNR ved målestasjonen:

Tabell 5.4: SNR Frøya [dB]

<b>Beregnet SNR [dB]</b>			
<b>Normalt støynivå Millington vs. Eckersley</b>		<b>Ekstrem atm.støy Millington vs. Eckersley</b>	
<b>Bø 7001M, 9007X</b>		<b>Bø 7001M, 9007X</b>	
Millington	34,52	Millington	24,52
Eckersley	34,52	Eckersley	24,52
<b>Berlevåg 7001Y</b>		<b>Berlevåg 7001Y</b>	
Millington	-14,46	Millington	-24,46
Eckersley	-18,32	Eckersley	-28,32
<b>Sylt 7499M</b>		<b>Sylt 7499M</b>	
Millington	-16,96	Millington	-26,96
Eckersley	-9,83	Eckersley	-19,83
<b>Ejde 9007M</b>		<b>Ejde 9007M</b>	
Millington	27,81	Millington	17,81
Eckersley	27,81	Eckersley	17,81
<b>Værlandet 7499Y, 9007Y</b>		<b>Værlandet 7499Y, 9007Y</b>	
Millington	10,79	Millington	0,79
Eckersley	16,16	Eckersley	6,16
<b>Jan Mayen 9007W, 7001X</b>		<b>Jan Mayen 9007W, 7001X</b>	
Millington	19,29	Millington	9,29
Eckersley	19,29	Eckersley	9,29

Med bakgrunn i minimumskravet for SNR på -10dB (se kap:4.4), de teoretiske beregningene og en normal atmosfærisk støy, vil målestasjonens mottaker kunne motta signaler fra følgende LORSTA:

- Bø, GRI 7001 og 9007.
- Værlandet, GRI 7499 og 9007.
- Ejde, GRI 9007.
- Jan Mayen, GRI 7001 og 9007.

## 5.2 Teoretisk beregning av utsendt effekt, jammerenhet.

Denne rapportens beregninger av den mobile jammerenheten tar utgangspunkt i de tre LORSTA som har de kraftigste feltstyrkene ved målestasjonen (tabell:5.4). Hensikten med jammerenheten er å introdusere en så stor grad av støy i mottakerantennen slik at mottakerens SNR blir dårligere enn minimumskravet på -10dB (se tabell:5.5). For utførte beregning av jammesignalene forutsettes følgende:

- Objektet som jammes(målet) har en moderne LoranC mottaker med et minimumskrav til SNR på -10dB.
- Feltstyrken til signalene som mottas ved målestasjonen er lik rapportens beregnede feltstyrkeverdier.
- Atmosfærisk støy er lik rapportens beregnede verdier.
- Jammerenheten er utrustet med en monopolantenne med like egenskaper som hos antennen som er omtalt i kap:4.8.6.
- Ved målestasjonen er det ingen tidlig rombølge eller unormal ionosfærisk støy.
- Terrenget fra jammer til objekt er homogent.
- Ingen ASF utover hva det homogene terrenget representerer.
- Mottaker har ingen fart eller retning.
- Mottaker benytter en H-felt antenne.

**Tabell 5.5:** LORSTA data, Frøya

LORSTA	Feltstyrke 1Km dB $\mu$ V/m	Feltstyrke Frøya dB $\mu$ V/m	Atm.støy Frøya dB $\mu$ V/m	SNR Frøya
Bø	135,50	75,00	41,00	34,52
Ejde	135,50	68,29	41,00	27,81
Jan Mayen	133,50	59,77	41,00	19,29

LORSTA	SNR Krav	N [I] Jammer dB $\mu$ V/m	N [I] Jammer $\mu$ V/m
Bø	-10,00	44,52	168,28
Ejde	-10,00	37,81	77,69
Jan Mayen	-10,00	29,29	29,15

### 5.2.1 Jamming av LORSTA Bø, teoretiske beregning

Tabell 5.6 gir en oversikt over hva som behøves for å jamme signalmottaket fra LORSTA BØ med tre forskjellige homogene utbredelsesveier.

Kolonne merket med EIRP<sup>2</sup> angir hvor mye effekt en isotropisk antenne skal utstråle for at mottakerens SNR skal bli dårligere enn -10db. Kolonnen ytterst til høyre angir hvor mye effekt jammerenheten må yte på inngangen til jammeantennen slik at antennen oppnår en utstrålt effekt lik "EIRP". Denne effekten er beregnet ved formel 4.20 med monopolantennens effektivitet (0.06% og tabell 4.1). Dempning av jammesignalet er, på samme måte som LoranC signalene, beregnet vha ITU-R tabeller for overflatedempning av radiobølger (se (ITU 2007)).

---

<sup>2</sup>Equivalent isotropically radiated power

**Tabell 5.6:** Jamming av LORSTA Bø, 3 typer topografi

Jamming av signal fra Bø, topografi fra jammer: Sjø					
Avstand km	Jammesignal dempning[dB]	Jammesign sender[dBuVm]	EIRP[W] Jammeantenne	Effekt kW transmitter	
5	14	58,52	0,20	0,33	
10	20	64,52	3,15	5,24	
20	26	70,52	50	83	
50	34,5	79,02	2217	3695	
100	41	85,52	39612	66020	

Jamming av signal fra Bø, topografi fra jammer: Tørr land					
Avstand km	Strekning dempning[dB]	Jammesign sender[dBuVm]	EIRP[W] Jammeantenne	Effekt kW transmitter	
5	15	59,52	0,25	0,41	
10	21	65,52	3,96	6,60	
20	28	72,52	79	132	
50	38	82,52	4963	8272	
100	47	91,52	157698	268830	

Jamming av signal fra Bø, topografi fra jammer: Fjell					
Avstand km	Strekning dempning[dB]	Jammesign sender[dBuVm]	EIRP[W] Jammeantenne	Effekt kW transmitter	
5	16	60,52	0,31	0,52	
10	23	67,52	6,28	10,46	
20	30	74,52	125	209	
50	44	88,52	19759	32931	
100	55	99,52	995010	1658351	

## 5.2.2 Jamming av LORSTA Jan Mayen, teoretiske verdier

Tabell 5.7 gir en oversikt over hva som behøves for å jamme signalmottaket fra LORSTA Jan Mayen med tre forskjellige homogene utbredelsesveier. Forklaring av tabell, se kap 5.2.1.

**Tabell 5.7:** Jamming av LORSTA Jan Mayen, 3 typer topografi

Jamming av signal fra Jan Mayen, topografi fra jammer: Sjø					
Avstand km	Strekning dempning[dB]	Jammesign sender[dBuVm]	EIRP[W] Jammeantenne	Effekt kW transmitter	
5	14	43,29	0,01	0,01	
10	20	49,29	0,09	0,16	
20	26	55,29	1,50	2,51	
50	34,5	63,79	67	111	
100	41	70,29	1189	1982	

Jamming av signal fra Jan Mayen, topografi fra jammer Tørr land					
Avstand km	Strekning dempning[dB]	Jammesign sender[dBuVm]	EIRP[W] Jammeantenne	Effekt kW transmitter	
5	15	44,29	0,01	0,01	
10	21	50,29	0,12	0,20	
20	28	57,29	2,38	3,97	
50	38	67,29	149	248	
100	47	76,29	4733	7889	

Jamming av signal fra Jan Mayen, topografi fra jammer Fjell					
Avstand km	Strekning dempning[dB]	Jammesign sender[dBuVm]	EIRP[W] Jammeantenne	Effekt kW transmitter	
5	16	45,29	0,01	0,02	
10	23	52,29	0,19	0,31	
20	30	59,29	3,78	6,30	
50	44	73,29	593	988	
100	55	84,29	29865	49774	

### 5.2.3 Jamming av LORSTA Ejde, teoretiske verdier

Tabell 5.8 gir en oversikt over hva som behøves for å jamme signalmottaket fra LORSTA Ejde med tre forskjellige homogene utbredelsesveier. Forklaring av tabell, se kap 5.2.1.



**Tabell 5.8:** Jamming av LORSTA Ejde, 3 typer topografi

Jamming av signal fra Ejde, topografi fra jammer: Sjø					
Avstand km	Strekning dempning[dB]	Jammesign sender[dBuVm]	EIRP[W] Jammeantenne	Effekt kW transmitter	
5	14	51,81	0,04	0,07	
10	20	57,81	0,67	1,12	
20	26	63,81	10,68	17,80	
50	34,5	72,31	473	788	
100	41	78,81	8443	14072	

Jamming av signal fra Ejde, topografi fra jammer Tørr land					
Avstand km	Strekning dempning[dB]	Jammesign sender[dBuVm]	EIRP[W] Jammeantenne	Effekt kW transmitter	
5	15	52,81	0,05	0,09	
10	21	58,81	0,84	1,41	
20	28	65,81	16,93	28,21	
50	38	75,81	1058	1763	
100	47	84,81	33613	56021	

Jamming av signal fra Ejde, topografi fra jammer Fjell					
Avstand km	Strekning dempning[dB]	Jammesign sender[dBuVm]	EIRP[W] Jammeantenne	Effekt kW transmitter	
5	16	53,81	0,07	0,11	
10	23	60,81	1,34	2,23	
20	30	67,81	26,83	44,71	
50	44	81,81	4212	7019	
100	55	92,81	212081	353469	

# 6 LF propogasjon/jammemålinger

## 6.1 Introduksjon

Denne oppgaven har så langt presentert teori om prinsippet til en LoranC mottaker, hvilke naturlige påvirkninger som kan degradere mottakerens ytelse og hva som kan gjøres med intensjon å degradere denne ytelsen. En tilsiktet degradering av mottakerens ytelse er utført ved jammemålinger på Frøya. Dette kapitlet har til hensikt å presentere de utførte jamme-målingene og hvordan ytelsen til mottaker ble påvirket av dette.

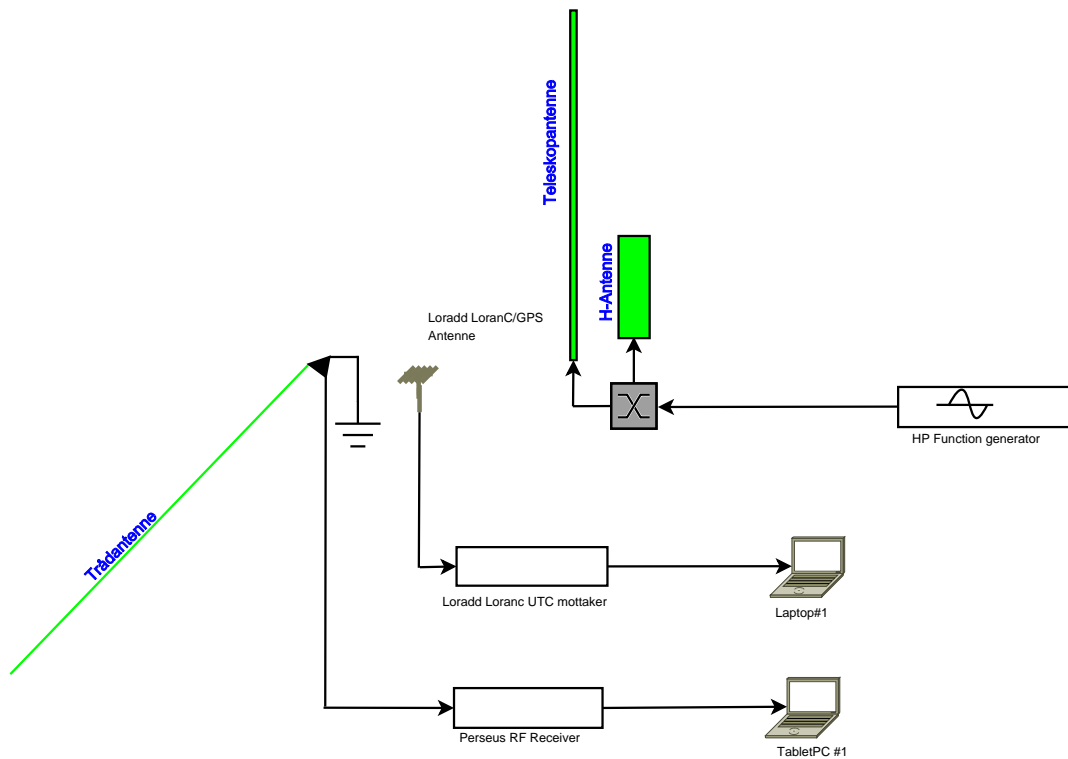
25 og 26. februar 2010 ble målingene utført på Frøya. Signaltypene som er benyttet til jamming er et resultat av antatte effektive signaltyper. Med effektiv menes her signaler som ut fra teorien (se kap:4.7) kan påvirke posisjonsbestemmelsen til LoranC mottakeren.

Formålet med målingene er å observere jamme-virkningen hos mottakeren og hvilke signaltyper som gir en observerbar forandring (feil) i mottakerens posisjonsberegning. Denne rapporten benytter FRP kravet (18-90m) som en grense på hva som kan forventes av posisjonsfeil ved normale forhold, posisjonsfeil som overstiger dette kravet bli beregnet som en tilsiktet påvirkning (les. jamming).

## 6.2 Oppsett av test/målestasjon

Frøya ble valgt på grunn av øyas geografiske plassering og at de teoretiske SNR-beregningene (se kap:5.1.2) viste gode forhold for mottak av tilstrekkelige LoranC signaler (se kap:5).

Antenner og måleutstyr ble satt opp som vist i figur:6-1 og figur:8-11. Teleskopantennen og stavantennen ble utplassert i forskjellige avstander til LoranC antennen, de ble flyttet langs med observasjonsantennen (Perseus), slik at avstanden mellom jamme- og observasjonsantennen er lik for alle målingene. Jammeantennene ble flyttet i 3 avstander [4m, 8m, 16m] fra LoranC antennen og signalstyrken inn på jammeantennen ble variert i tre trinn [4V, 6V, 10V] (se kap:6.5.3).



Figur 6-1: Oppsett for jammemålinger på Frøya

### 6.2.1 Observasjonsantenner

Observasjonsantenner er de antennene som kun mottar signaler og har ingen funksjon som senderantenner. I måleoppsettet er det benyttet to typer antenner til dette formålet. En kombinert LoranC/GPS antenne som er utviklet av Reelektronika og den andre er en 20m trådantenne som er sammenkoblet med en koaksialkabel[8m]. Trådantennen er koplet til Perseus SDR og er benyttet til referanse-målinger samt til observasjoner av støy og signaler.

### 6.2.2 Jammeantenner

I måleoppsettet er det benyttet to forskjellige antennetyper til jamming. En stavantenne og en teleskopantenne av glassfiber. Kap:8.5 gir en mer detaljert beskrivelse av de benyttede jammeantennene.

### 6.2.3 Mottakere

For observasjoner er det i måleoppsettet benyttet to typer mottakere. En LoranC mottaker (se kap:8.2) og en software definert RF-radio(SDR) (se kap:8.4).

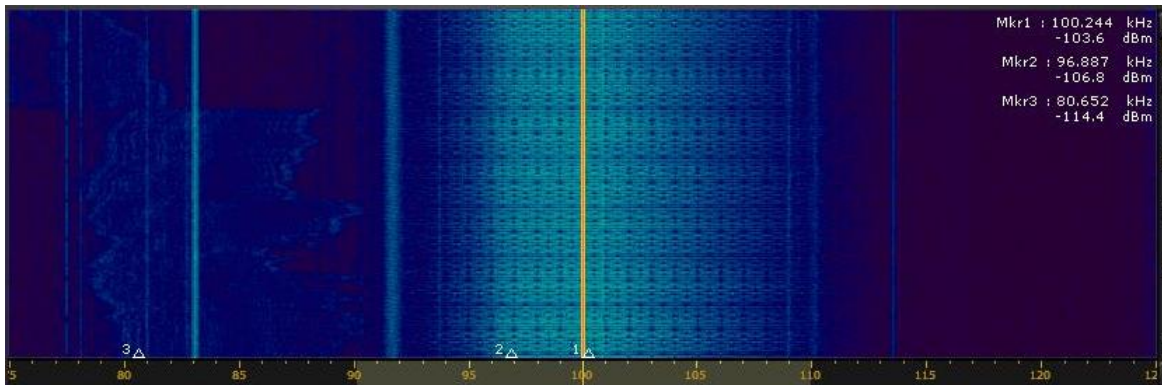
## 6.3 Modulasjonstyper

Dette kapittelet omhandler de modulasjonstypene som er brukt under jamming. Figurene viser Perseus-skjermbildet som et *Waterfall* spekter, spekteret er sentrert rundt 100kHz. Signalene i spektret vises som linjer/farger, lyse farger indikerer høyere signalintensitet.

De forskjellige typene av modulasjon er oppført med samme benevnning som brukt i tabellen over jammeobservasjonene, se figur:6.4, 6.5 og 6.6. For en mer detaljert gjennomgang av modulasjonstypene se kap:4.7.

### 6.3.1 Umodulert bærebølge, UB

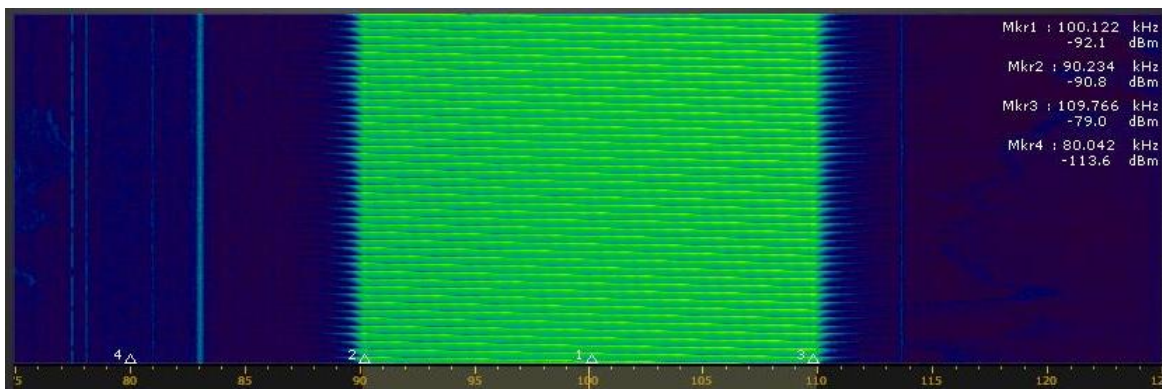
Figur 6-2 viser jamming ved bruk av en 100kHz umodulerte bærebølge.



Figur 6-2: Countinuous wave, ren tone

### 6.3.2 Frekvenssveipet bærebølge, FSB

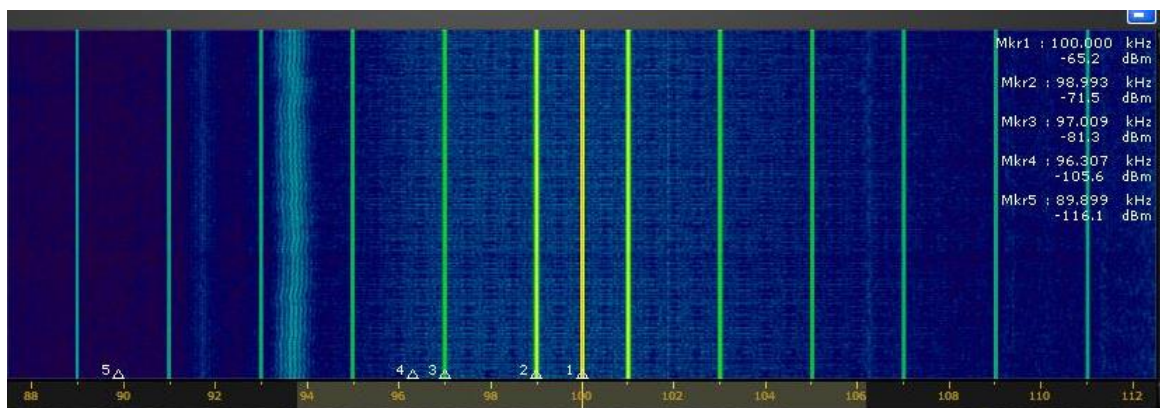
Figur 6-3 viser den 1kHz umodulerte bærebølgen som i løpet av 200ms sveipes i frekvensområdet fra 90kHz til 110kHz.



Figur 6-3: Frekvenssveipet bærebølge

### 6.3.3 Amplitudemodulasjon, AM

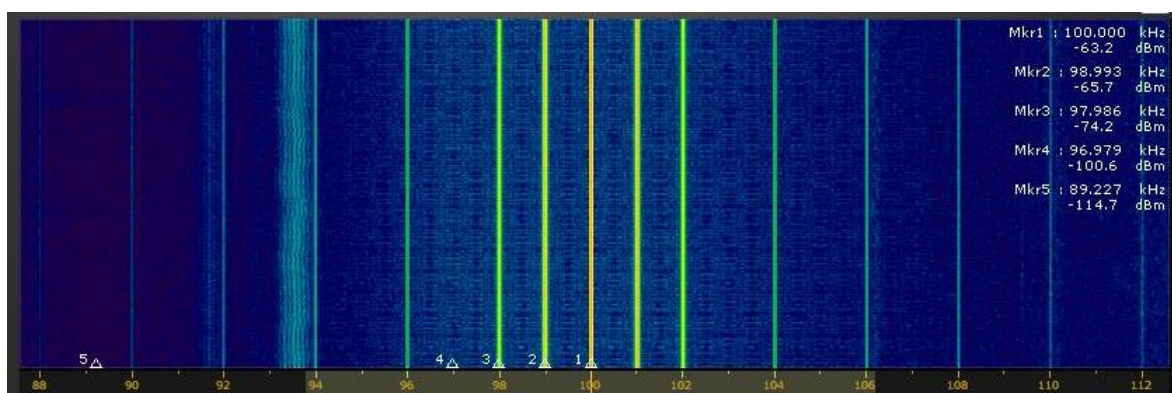
Figur 6-4 viser jamming ved bruk av amplitudemodulasjon med 80% modulasjonsindeks, senterfrekvensen er 100kHz og modulert med en 1kHz ren tone.



Figur 6-4: Amplitudemodulert signal

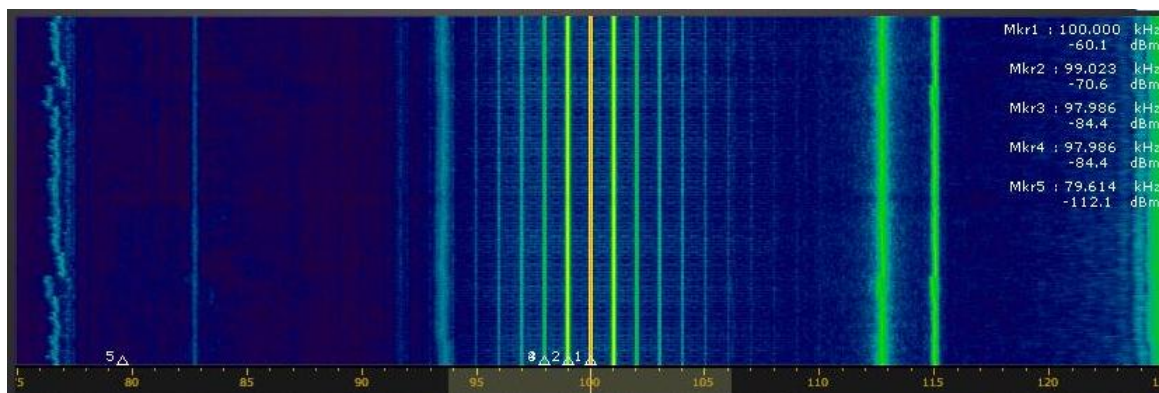
### 6.3.4 Frekvensmodulasjon, FM1 og FM2

Figur 6-15 viser jamming ved bruk av en frekvensmodulert bølge med senterfrekvens 100kHz, modulert med en 1kHz ren tone og med en frekvensdeviasjon på 1kHz.



Figur 6-5: Frekvensmodulert signal nr 1

Figur 6-6 viser jamming ved bruk av en frekvensmodulert bølge med senterfrekvens 100kHz, modulert med en 500Hz ren tone og med en frekvensdeviasjon på 1kHz.



Figur 6-6: Frekvensmodulert signal nr 2

Ut fra figurene 6-5 og 6-6 ser man at den eneste forskjellen mellom de to frekvensmodulerte signalene er at FM2 har spektrallinjer for hver 1kHz, mens FM1 har spektrallinjer for 1kHz ut fra senterfrekvens deretter for hvert partall av 1kHz(102, 104, 106 osv).

## 6.4 Måleprosedyrer

I denne oppgaven er det utarbeidet to måleprosedyrer, se kap:6.4.1 og kap:6.4.2.

### 6.4.1 Prosedyre for oppsett av måleutstyret

1. Sjekk alle signalkabler for god elektrisk kontakt, påse at jording er gjennomgående for alle kabler.
2. Sjekk all kabling for utvendige skader eller merker.
3. Sett opp målestasjonen etter figur:6-1.
4. Vent til Loradd UTC mottaker har tre grønne lys i frontpanelet (se kap:8.2).
5. Utfør referansemålinger med Loradd UTC og Perseus. Målingene skal lagres på datamaskin men navn *Ref (løpenummer)*. Referansemålingen skal observeres for uregelmessigheter og eksisterende interferens i frekvensbåndet til LoranC (90-110kHz).
6. Utfør oppstartsprosedyre til HP 33120A Function Generator<sup>1</sup>
7. Utfør jammemålingen i henhold til kap:6.4.2.
8. Slå av alt utstyr iht brukermanualer.

<sup>1</sup>Brukermanual HP 33120A

## 6.4.2 Jammeprosedyre

1. Påse at punkt 1 til 6 i utstyrsprosedyren (kap:6.4.1) er utført.
2. Benytt tabell (se tabell:6.4,6.5 og 6.6) for valg av antenntype, modulasjon og avstand mellom jammeantenne og LoranC antenne.
3. Start lagring av LoranC og Perseus observasjoner, observer Loradd posisjonsplott(LERXAnalyser). Vent i minimum 15 Loradd observasjoner/plott ( $15 \cdot 5s = 75$  sekund) før neste punkt i denne prosedyren.
4. Valgt antenne skal koples til signalgenerator. Signalgenerator startes med valgt modulasjon og  $V_d$ -spenning etter tabell i pkt:2.
5. Observer Loradd posisjonsplott.
6. Hvis posisjonsplottet har stabilisert seg etter 55 plott, slå så av signalgeneratoren. Hvis ikke, vent i 10 nye plott før signalgenerator avslås.
7. Avslutt Perseus-logg.
8. Stans logg av posisjonsplott hvis plottet har stabilisert seg ved posisjonen før jamming(jmf pkt:3).
9. Hvis jammingen er utført gå videre til pkt:8 i kap:6.4.1. Hvis det gjenstår flere jammemålinger gå til pkt:2 til 8.

## 6.5 Observasjoner

Alle observasjonene i dette kapittelet er hentet fra målingen på Frøya, den 25. og 26.februar 2010. Under målingene var det ingen nedbør, temperatur  $-6C$ , flau vind og god sikt, forholdene var tilnærmet konstante under alle observasjonene.

### 6.5.1 Sammenligning av de teoretisk beregning og de målte støy-verdiene.

#### Teoretiske beregninger for Frøya

Støyberegningene som vist i tabell 6.1 er et resultat av ITU modeller (ITU-R P.372-10) som gjelder for Frøya i løpet av ett kalenderår. Verdiene som er benyttet til beregninger i denne rapporten er hentet fra tabellens rad "Vinter". Kapittel 4.6.1 gir en forklaring av ITU-verdiene i de følgende tabellene: 6.2 og 6.1.



Tabell 6.1: Støyberegning ett kalenderår, Frøya

		Avlest ITU-R P.372.10		Beregninger fra ITU-R P.372.10		
Årstid	Lokal tid	$F_{am}$		En	Støy [N]	$\frac{dB_{\mu V}}{m}$
		1Mhz	100kHz			
Vinter	00-04	1	72,00	115,00	43,48	60,48
	04-08	2	61,00	109,00	37,48 0	54,48
	08-12	3	27,00	93,00	21,48	38,48
	12-16	4	40,00	95,00	23,48	40,48
	16-20	5	60,00	103,00	31,48	48,48
	20-24	6	66,00	105,00	33,48	50,48
Vår	00-04	7	63,00	110,00	38,48	55,48
	04-08	8	35,00	90,00	18,48	35,48
	08-12	9	26,00	90,00	18,48	35,48
	12-16	10	35,00	95,00	23,48	40,48
	16-20	11	35,00	95,00	23,48	40,48
	20-24	12	62,00	110,00	38,48	55,48
Sommer	00-04	13	63,00	115,00	43,48	60,48
	04-08	14	42,00	105,00	33,48	50,48
	08-12	15	33,00	100,00	28,48	45,48
	12-16	16	41,00	105,00	33,48	50,48
	16-20	17	40,00	95,00	23,48	40,48
	20-24	18	65,00	115,00	43,48	60,48
Høst	00-04	19	65,00	110,00	38,48	55,48
	04-08	20	55,00	105,00	33,48	50,48
	08-12	21	26,00	95,00	23,48	40,48
	12-16	22	45,00	95,00	23,48	40,48
	16-20	23	55,00	105,00	33,48	50,48
	20-24	24	65,00	110,00	38,48	55,48
					Totalt	1156,51
					Middelverdi	48,19



## Atmosfærisk støy

Tabell 6.2 viser forskjellen mellom de teoretiske beregningene (tabell:6.1) og observasjonene av atmosfærisk støy. Figurens øvre del viser de teoretiske beregningene og den nedre delen viser de observerte støyverdiene i tillegg til differansen mellom de beregnede og målte støyverdier. Støynivået er hentet fra logg .txt (Perseus-logg, Tabell:8.1 viser et eksempel på en slik logg).

**Tabell 6.2:** Teoretiske beregninger vs. målt atmosfærisk støy

		ITU støy,		Frøya	RMS felt	ITU fig
Dato	Tid	Fa 1MHz(dB)	Fa 100kHz(dB)	$dB\mu V/m$		
24.feb	08-12	27,00	93,00	38,48	17,abc	
25.feb	08-12	27,00	93,00	38,48	17,abc	
25.feb	12-16	40,00	95,00	40,48	18,abc	
26.feb	12-16	60,00	95,00	40,48	19,abc	

		Målt støy	Perseus BW25kHz	$\Delta$ Støy	$\Delta$ Støy	Fil
Dato	Tid	dBm	$dB\mu V/m$	målt vs. ITU[dB]	målt vs. midl.[dB]	
24.feb	08-12	-113,00	37,97	-0,51	10,22	ref1
25.feb	08-12	-110,00	40,97	2,49	7,22	ref1
25.feb	12-16	-109,00	41,97	1,49	6,22	ref2
26.feb	12-16	-114,00	36,97	-3,51	11,22	avst1

Tabell 6.2 viser at den største differansen mellom observert og beregnet verdi er 3.51dB. Tabellen viser også at beregninger med utgangspunkt i støyens middelværdi (48.19dB se tabell:6.1) vil gi en større differanse enn om man benytter de reelle støyverdiene (ved riktig årstid/tidspunkt).

Målingene er begrenset i tid slik at oppnådde resultatene ikke kan benyttes til vurdering av ITU dataene gyldighet for det fulle kalenderåret. Ut fra tabellen og de øvrige resultatene i denne rapporten er de observerte og ITU-beregningene for atmosfærisk støy forholdsvis like (maksimal differanse 3.51dB).

Verdien av den atmosfæriske støyen vil i denne rapporten være referert til observasjonene av atmosfærisk støy.

### 6.5.2 Teoretisk beregnet vs. målt LoranC signal

Reelektronika oppgir at signalnivået i LERXanalyser er av en relativ størrelse, signalet oppgis i forhold til et signalnivå som er definert av Reelektronika. På grunn av dette kan

ikke LoranC målingene gi den reelle signalverdien til det mottatte LoranC signalet. På forespørsel via e-post kunne Reelektronika<sup>2</sup> bekrefte at signal-støy måling ved hjelp av LERXanalyser vil gi forholdet mellom LoranC signalet og støyen inn på antennen. Ut i fra dette signal-støynivået kan man med hjelp av SNR-beregninger få en indikasjon på det mottatte LoranC signalet. På grunn av dette vil sammenligningen av de teoretiske beregninger og observerte signalverdier være på grunnlag av signal-støy forholdet i stedet for de rene signalnivåene (se tabell:6.3). De SNR nivåene som benyttes i denne rapporten er hentet fra observasjonene som er utført 25.februar (se tabeller:6.4, 6.5, 6.6 og figurene:8-15, 8-16). Tabell: viser denne sammenligningen.

**Tabell 6.3:** Sammenligning av beregnet og observert LoranC SNR

Beregnet SNR [dB]				Observert SNR [dB]	
Normalt støynivå Millington vs. Eckersley		Ekstrem atm.støy Millington vs. Eckersley		Ref1 25.feb	Ref2 25.feb
Bø 7001M, 9007X		Bø 7001M, 9007X			
Millington	34,52	Millington	24,52	14	13
Eckersley	34,52	Eckersley	24,52		
Berlevåg 7001Y		Berlevåg 7001Y			
Millington	-14,46	Millington	-24,46	-17	-14,66
Eckersley	-18,32	Eckersley	-28,32		
Sylt 7499M		Sylt 7499M			
Millington	-16,96	Millington	-26,96	-17	-22,00
Eckersley	-9,83	Eckersley	-19,83		
Ejde 9007M		Ejde 9007M			
Millington	27,81	Millington	17,81	8,5	6,62
Eckersley	27,81	Eckersley	17,81		
Værlandet 7499Y, 9007Y		Værlandet 7499Y, 9007Y			
Millington	10,79	Millington	0,79	6,5	6,15
Eckersley	16,16	Eckersley	6,16		
Jan Mayen 9007W, 7001X		Jan Mayen 9007W, 7001X			
Millington	19,29	Millington	9,29	-2	-2,00
Eckersley	19,29	Eckersley	9,29		

Fra tabell:6.3 kan man se at Millingtons metode samsvarer godt med målte verdier for Berlevåg, Sylt og Værlandet. Mens beregninger for Bø, Ejde og Jan Mayen viser en stor differanse mellom beregnet og målt SNR. LORSTA Bø store differanse kan skyldes at disse signalene utbrer seg over de høye fjellene i Lofoten, dette kan skape en høyere grad

<sup>2</sup>Prof.dr. Durk van Willigen - REELEKTRONIKA

av signaldempning enn hva ITU har i sine tabeller (ITU 2007). For Ejde og Jan Mayen er det litt vanskeligere å forklare den store differansen. Ettersom signalene utbrer seg kun over en homogen flate (sjø) er det ikke noen fysiske hindringer som skulle føre til denne feilen. En forhøynet demping på grunn av diffraksjon og bølgehøyde kan gjøre differansen noe mindre, men det er usannsynlig at dette er den hele grunnen.

### 6.5.3 Jammeobservasjoner

#### **Jammeobservasjoner utført ved hjelp av LoranC mottaker og Perseus SDR**

Dette avsnittet viser samtlige jammesenarioer, observerte signalverdier og feilplottet til mottakeren. Rad i tabell benevnet med "REF X" viser en referansemåling uten påvirkning av jammesignal. Kolonne "Signal" viser observasjonene fra LoranC og målt atmosfærisk støy (Perseus), kolonne "Plott Lorad" er scatterplottets posisjonsfeil.

Figur 6-7 viser posisjonsplottet fra LoranC-mottakeren (LerxAnalyser) som et grafisk scatterplott.

Tabell 6.4: Jammeobservasjoner del 1 av 3

Dato	Fil	Signal	Vp-p	Antenne	Avst [m]	Måleoppsett				Signal						Plott, Loradd			
						Loradd[dB]		Perseus [dBm]		95 %		99 %		95 %		99 %			
						FFT 100kHz	Noise Loop1	Noise Loop2	Jamme sign	Loran sign	Atm. støy	Avg Err	Real Err	Avg Err	Real Err				
25.feb	REF 1	-	-	Loradd	-	48	36,76	36,95	-	-104	-109	6,4	9,9	8,7	12,6				
25.feb	Jam 1	FM1	6	Teleskop	4	70	43,21	45,67	-63	-102	-111	84	119	134,7	133				
25.feb	Jam 2	AM	6	Teleskop	4	69	42,52	45,06	-71	-103	-112	224,6	270	265	310				
25.feb	Jam 3	UB	6	Teleskop	4	74	44,83	47,87	-59	-103	-112	454	642	510	697				
25.feb	Jam 4	FSB	6	Teleskop	4	50	55,01	57,04	-90	-	-112	40	49	52	59				
25.feb	Jam 5	FM2	6	Teleskop	4	72	43,57	45,63	-60	-103	-111	56	76	80	100				
25.feb	Jam 6	FM1	6	Teleskop	8	68	44,04	37,70	-51	-102	-112	13	13,5	22	26				
25.feb	Jam 7	FM1	6	Magnetisk	8	60	38,70	40,20	-82	-103	-112	12	15	16	18				
25.feb	Jam 8	AM	6	Teleskop	8	65	42,30	38,50	-54	-103	-110	37	35	50	54				
25.feb	Jam 9	AM	6	Magnetisk	8	60	38,70	39,60	-84	-103	-111	34	34,5	37,5	39,5				
25.feb	Jam 10	UB	6	Teleskop	8	72	45,10	39,10	-47	-103	-113	231	385	246	400				
25.feb	Jam 11	UB	6	Magnetisk	8	64	37,60	41,00	-78	-103	-112	83,5	82	98	102				
25.feb	Jam 12	FSB	6	Teleskop	8	52	55,30	41,60	-76	-	-112	18	21	25	28				
25.feb	Jam 13	FSB	6	Magnetisk	8	46	43,40	49,00	-100	-	-112	14	16,5	20	22				
25.feb	Jam 14	FM2	6	Teleskop	8	70	44,00	37,30	-48,5	-102	-112	20	26	26	33				
25.feb	Jam 15	FM2	6	Magnetisk	8	60	37,30	39,1	-84	-103	-112	31	31,5	42	42				

Tabell 6.5: Jammeobservasjoner del 2 av 3

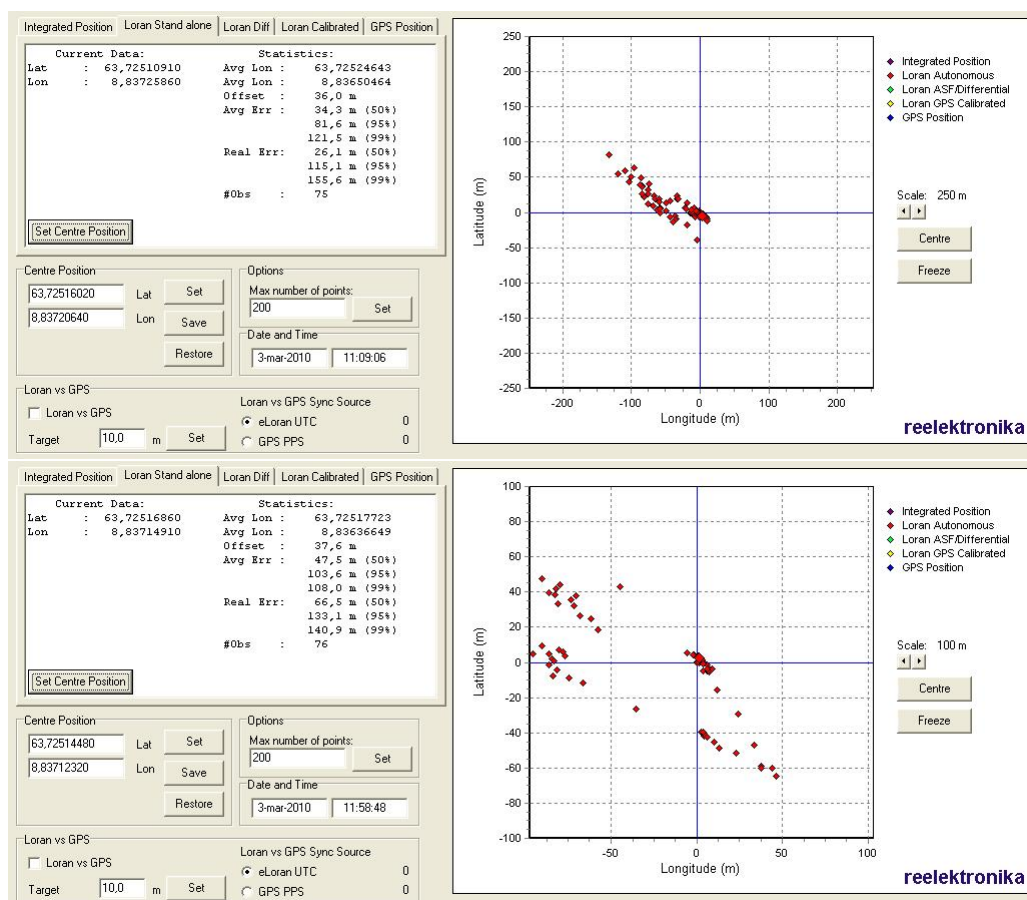
Måleoppsett				Signal				Plott, Loradd							
Dato	Fil	Signal	Vp-p	Antenne	Avst [m]	Loradd[dB]		Perseus [dBm]		95 %		99 %			
						FFT 100kHz	Noise Loop1	Noise Loop2	Jamme sign	Loran sign	Atm. støy	Avg Err	Real Err		
25.feb	REF 2	-	-	Loradd	-	48	38,63	36,70	-	-107	-116	8	8,6	9	10
25.feb	Jam 16	FM1	6	Teleskop	16	68	43,20	38,50	-57,6	-102	-112	58	100	61	104
25.feb	Jam 17	FM1	6	Magnetisk	16	50	36,60	37,80	-88,4	-102	-113	8	7,7	9	10
25.feb	Jam 18	AM	6	Teleskop	16	65	40,70	36,90	-59,7	-101	-112	58	63	74	79
25.feb	Jam 19	AM	6	Magnetisk	16	47	36,60	37,10	-96	-102	-113	11	12	12,5	14
25.feb	Jam 20	UB	6	Teleskop	16	71	46,70	40,40	-53,7	-102	-113	144	160	168	183
25.feb	Jam 21	UB	6	Magnetisk	16	51	36,10	38,30	-84	-102	-113	18	19	26	27
25.feb	Jam 22	FSB	6	Teleskop	16	50	54,30	44,90	-85	-	-112	17	22	23	30
25.feb	Jam 23	FSB	6	Magnetisk	16	47	38,60	39,00	-103	-	-113	10,5	12	13	13,5
25.feb	Jam 24	FM2	6	Teleskop	16	70	43,30	38,50	-53,7	-108	-116	23,5	22	29,5	27,5
25.feb	Jam 25	FM2	6	Magnetisk	16	50	37,60	37,40	-85	-107	-116	5,1	6,5	6,1	8

Tabell 6.6: Jammeobservasjoner del 3 av 3

Måleoppsett										Signal										Plott, Loradd					
Dato	Fil	Signal	Vp-p	Antenne	Avst [m]	Loradd[dB]			Perseus [dBm]			95 %			99 %										
						FFT 100kHz	Noise Loop1	Noise Loop2	Jamme sign	Loran sign	Atm. støy	Avg Err	Real Err	Avg Err	Real Err										
26.feb	Jam 1	FM1	4	Teleskop	4	68	43,8	41,1	-68,5	-106	-118	152	125	173	137										
26.feb	Jam 2	FM1	4	Magnetisk	4	62	40,21	40,5	-94	-105	-120	36,5	65	76	98										
26.feb	Jam 3	FM1	6	Teleskop	4	71	47,4	39,3	-65	-104	-120	57	69	65	76										
26.feb	Jam 4	FM1	6	Magnetisk	4	65	40,7	42,6	-91	-104	-120	130	234	141	245										
26.feb	Jam 5	FM1	10	Teleskop	4	76	51	42	-60,6	-103	-120	85	124	128	135										
26.feb	Jam 6	FM1	10	Magnetisk	4	70	43,8	46,5	-87	-103	-122	211	355	228	370										
26.feb	Jam 7	AM	4	Teleskop	4	66	45	41	-70,7	-103	-122	69	73	88	85										
26.feb	Jam 8	AM	4	Magnetisk	4	60	41	42	-96,7	-103	-120	60	65	69	73,5										
26.feb	Jam 9	AM	6	Teleskop	4	70	45,3	41,5	-67,1	-105	-120	119	119	192	192										
26.feb	Jam 10	AM	6	Magnetisk	4	62	41,8	42,3	-93	-107	-122	66	104	69,5	107,5										
26.feb	Jam 11	AM	10	Teleskop	4	72	48,3	39,7	-62,7	-105	-120	169	210	209	250										
26.feb	Jam 12	AM	10	Magnetisk	4	68	43,8	44,4	-89	-105	-120	81,5	115	121,5	155,5										
26.feb	Jam 13	FSB	4	Teleskop	4	52	53,8	43,2	-92	-	-120	103,5	133	108	141										
26.feb	Jam 14	FSB	4	Magnetisk	4	48	46,9	49,5	-104	-	-120	85	95	93	103										
26.feb	Jam 15	FSB	6	Teleskop	4	52	57,8	45,3	-89	-	-121	79	123	272	221,5										
26.feb	Jam 16	FSB	6	Magnetisk	4	48	48	51	-103	-	-119	100	120	121	141										
26.feb	Jam 17	FSB	10	Teleskop	4	54	62	48,5	-84	-	-120	75	74	767	775										
26.feb	Jam 18	FSB	10	Magnetisk	4	51	52,4	56,5	-105	-	-118	105	146,5	120	161										
26.feb	Jam 19	UB	4	Teleskop	4	71	44,5	39,7	-64,6	-106	-122	142	150	164	171										
26.feb	Jam 20	UB	4	Magnetisk	4	66	41,3	41,3	-90	-102	-120	52	70	87	110										
26.feb	Jam 21	UB	6	Teleskop	4	76	48,7	40,8	-61,1	-104	-122	94,5	103,5	182	175										
26.feb	Jam 22	UB	6	Magnetisk	4	70	41,3	43,1	-87	-103	-122	167	250	180	265										
26.feb	Jam 23	UB	10	Teleskop	4	77	52,9	42,5	-56,7	-102	-121	307	367	386	391										
26.feb	Jam 24	UB	10	Magnetisk	4	72	43,7	47,2	-83	-104	-120	225	305	271	351										

## Grafisk fremstilling av jammeresultat, scatterplott

Nedenfor vises noen av de grafiske posisjonsplottene slik de blir presentert av programmet LERXAnalyser. Figur 6-7 viser scatterplottet etter jamming for Jam12 og Jam13 den 26.februar (se kap:6.5.3).



Figur 6-7: Eksempler på scatterplott, jam12 og jam13

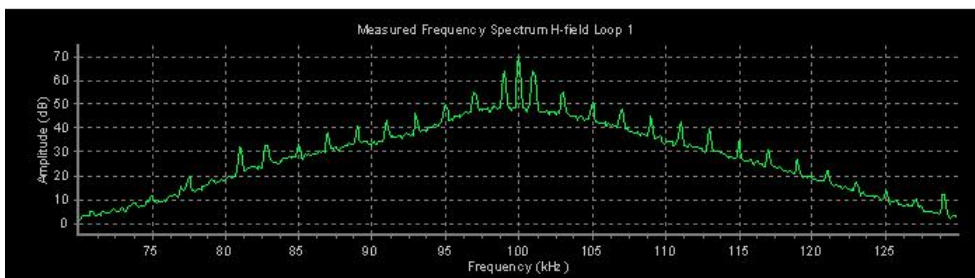
### 6.5.4 Antenne observasjoner

Som en kan se ut fra tabeller i kap:6.5.3 vil jammesignalets feltstyrke være fra 3 til 6 dB svakere ved bruk av den magnetiske antennen sammenlignet med teleskopantennen. Man kan også se ut fra målt støy i sløyfe(Loop) 1 og 2 at antennene skaper mest støy i forskjellige sløyfer. Den magnetiske antennen påvirker sløyfe 2 i størst grad mens teleskopantennen påvirker i størst grad sløyfe 1. Dette samsvarer godt med antennteorien omhandlet i kap 8.5, der en elektrisk og en magnetisk antenne har 90 grader forskjell på E og H feltet.

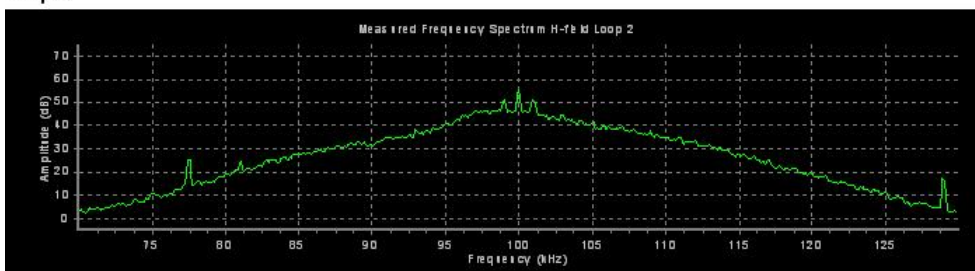
Forskjellen på det transmitterte feltet kan også sees ut fra målt FFT til mottakeren. Figur 6-8 viser scenarioene Jam 9 og Jam 10, dette er AM scenario med 6V jammesignal og en 4m avstand til LoranC antenne med henholdsvis teleskop og magnetisk antenne.

## AM

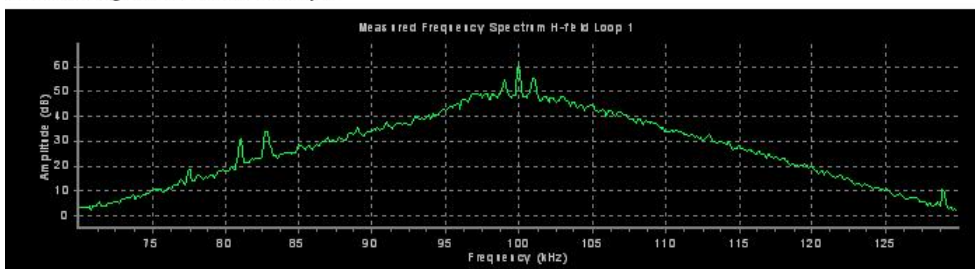
## Jam9 Teleskop feilplott 119m Loop1



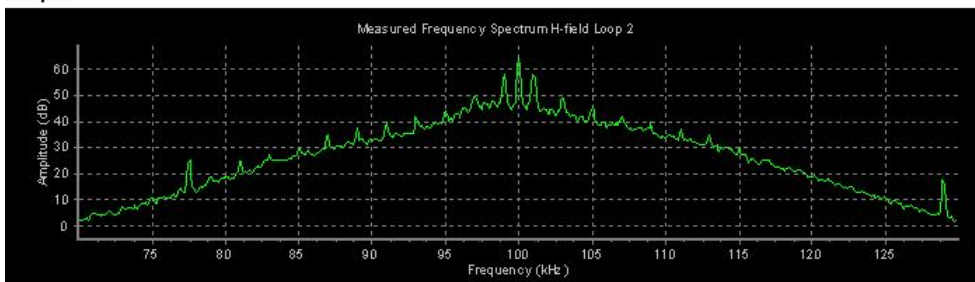
## Loop2



## Jam10 Magnetisk, feil 66m Loop1



## Loop2



Figur 6-8: FFT, Magnetisk vs. Teleskopantenne, jam9 og jam10

Ut i fra figur 6-8 ser man at teleskopantennen gir kraftigst signal i sløyfe 1, 70dB mot 55dB. Mens den magnetiske antennen gir kraftigst signal i Loop2, 63dB mot 60dB. Ettersom sløyfe 1 og 2 er i 90 graders vinkel i forhold til hverandre stemmer dette godt overens med tidligere omhandlet antenneteori.



### 6.5.5 Drøfting, jammeobservasjoner

Med utgangspunkt i observasjonene i kap:6.5.3 vil dette kapittelet gi en oversikt over minimum støy i mottakeren for at mottakeren skal gi en posisjonfeil som overgår kravspesifikasjonen. Kravspesifikasjonen benyttet i denne rapporten er definert av FRP<sup>3</sup>, FRP kravet er 18-90 meter for repeterbar nøyaktighet.

Tabell 6.7 viser de første jamme-scenarioene der feilplottet overgår FRP-kravet på 90m, alle målingene i denne tabellen ble utført 26.februar. Raden i tabellen merket "Ref" er signal-, støynivå og posisjonsfeil før jamming, mens raden under denne gir signal-, støynivå og posisjonsfeil under jamming. Det kan også merkes at alle disse målingene ble utført lik signalspenning på 6V og at avstanden mellom jamme- og LoranC antennen er lik(4m).

**Tabell 6.7:** Første jamming der feilplottet overgår 90m.

<b>Første jamming som overgår 90m feilplott vs referanse, 26.feb.</b>									
<b>Måleoppsett</b>				<b>Plott, Loradd</b>					
<b>Fil</b>	<b>Vp-p</b>	<b>Antenne</b>	<b>Avst [m]</b>	<b>Loradd[dB]</b>			<b>95 %</b>		
				<b>FFT 100kHz</b>	<b>Noise Loop1</b>	<b>Noise Loop2</b>	<b>Avg A Err</b>	<b>Real Err</b>	
Ref jam 21				49	38,2	38,6	9,8	9,6	
<b>Jam 21 UB</b>	6	Teleskop	4	76	48,7	40,8	94,5	103,5	
		Differanse		27	10,5	2,2	84,7	93,9	
Ref jam 16				48	40,4	39,4	7,2	6,9	
<b>Jam 16 FSB</b>	6	Magnetisk	4	49	48	51	100	120	
		Differanse		1	7,6	11,6	92,8	113,1	
Ref jam 9				48	39,4	40,3	9,5	8,9	
<b>Jam 9 AM</b>	6	Teleskop	4	70	45,3	41,5	119	119	
		Differanse		22	5,9	1,2	109,5	110,1	
Ref jam 4				49	40,8	40,2	7,8	9,8	
<b>Jam 4 FM1</b>	6	Magnetisk	4	65	40,7	42,6	130	234	
		Differanse		16	-0,1	2,4	122,2	224,2	

#### Jamming ved bruk av umodulert bærebølge, UB

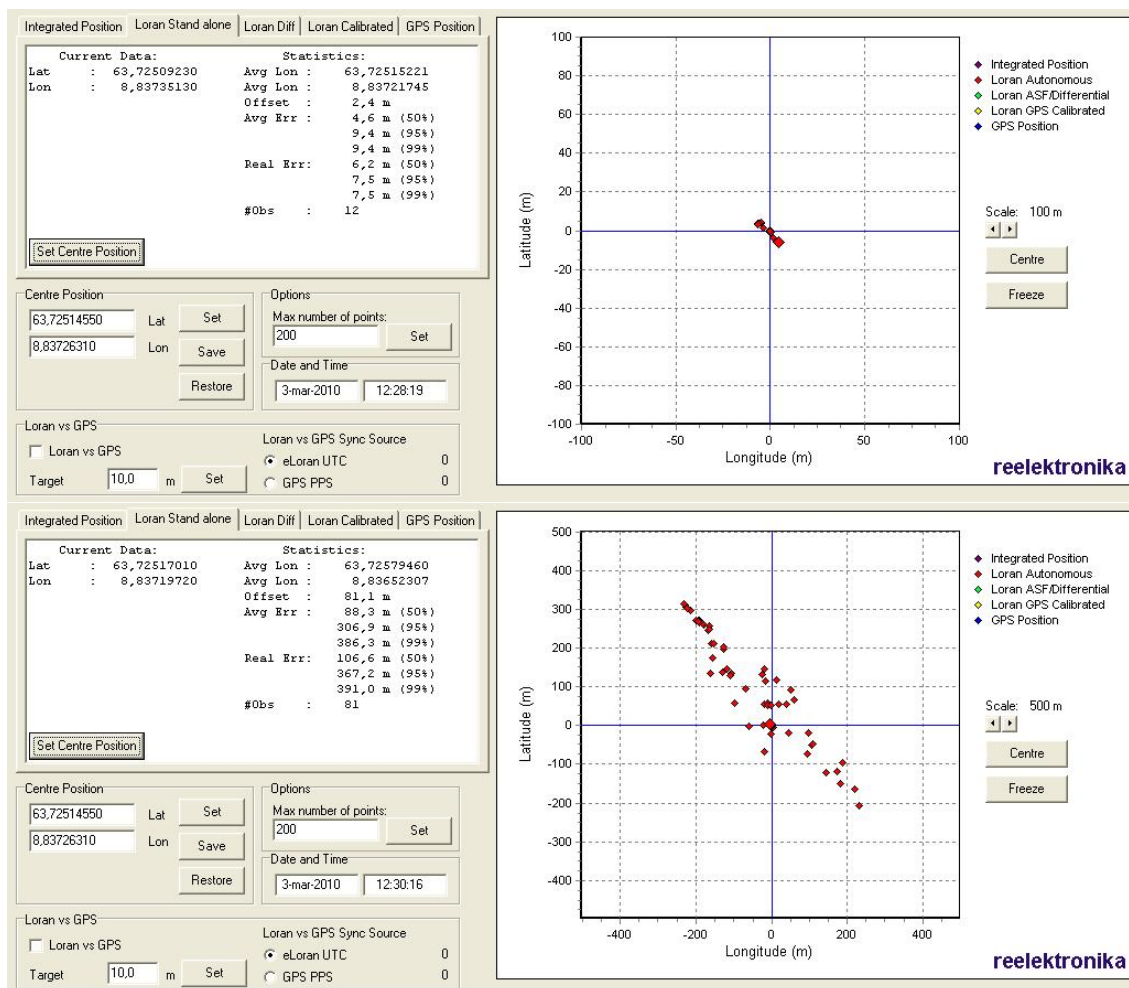
Fra observasjonene ser man at UB-jamming gir de høyeste feilplottene. De 4 scenarioene som gav de største feilplottet (225m-454m) var ved UB jamming. UB hadde også flest scenarioer (7 av 10) som fremprovoserte feilplott som oversteg FRP-kravet. Dette

<sup>3</sup>Federal Radionavigation Plan, 2001

kan ha flere årsaker, men man kan se ut fra FFT-verdi at signalintensiteten ved UB er høy og på grunn av det induseres en stor grad av interferens. Ettersom signalgenerator sender med fast effekt vil også effekten være større ved 100kHz enn ved bruk av modulerede signalformer der effekten må fordele seg over flere frekvenskomponenter (bredere spekter).

Hovedgrunnen til det store utslaget ved UB-jamming kan være at et jammesignal ved 100kHz vil befinne seg, i frekvens, akkurat på den eneste frekvensen der alle GRI har en komponent i frekvensspekteret. Det vil si at ved UB-jamming vil jammesignalet ved 100kHz være i synkron interferens ( $N=0$ ) med alle kjedene i LoranC systemet (alle GRI)(se formel:4.2). UB vil også kunne gi en likestrøms komponent til LoranC signalet, dette kan skape forstyrrelser i deteksjonen av pulsene. Maksimal jammeeffekt kan oppnås ved at UB har 0 eller 180 grader faseforskjell i forhold til eksisterende LoranC signal. Forvrengningen av pulsens form kombinert med påvirkning av fasefølgingen vil samlet være med på å forandre målingen av ECD ,som igjen kan føre til feildeteksjon av LoranC pulser.

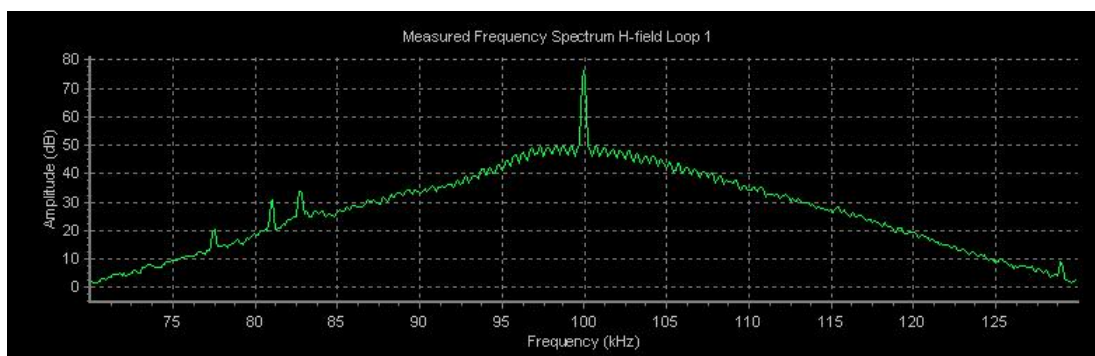
Ettersom mottakeren ikke rapporterte noen feil ved UB-jamming og fortsatte å plote kontinuerlig beregnet posisjon hvert 5.sekund vil resultatet av UB kunne karakteriseres som spoofing. Figur 6-9 gir et eksempel på posisjonsplott fra mottakeren før og etter UB-jamming. Eksemplet er hentet fra 26.feb Jam 23.



Figur 6-9: Posisjonsplott før og etter UB jamming

Fra figur 6-9 ser man at spredningen av plottet er mye større etter jamming. Det karakteristiske LoranC plottets ellipsoide-form kan fremdeles observeres men nå i mer flatttrykt (smørt utover i to retninger). At formen er fremdeles en ellipsoide tilsier at mottakeren har låst på LORSTA-signalet men har problemer med å følge signalet ved hjelp av den tredje nullgjennomgangen.

Frekvensspekteret ved denne jammingen vises i figur 6-10:

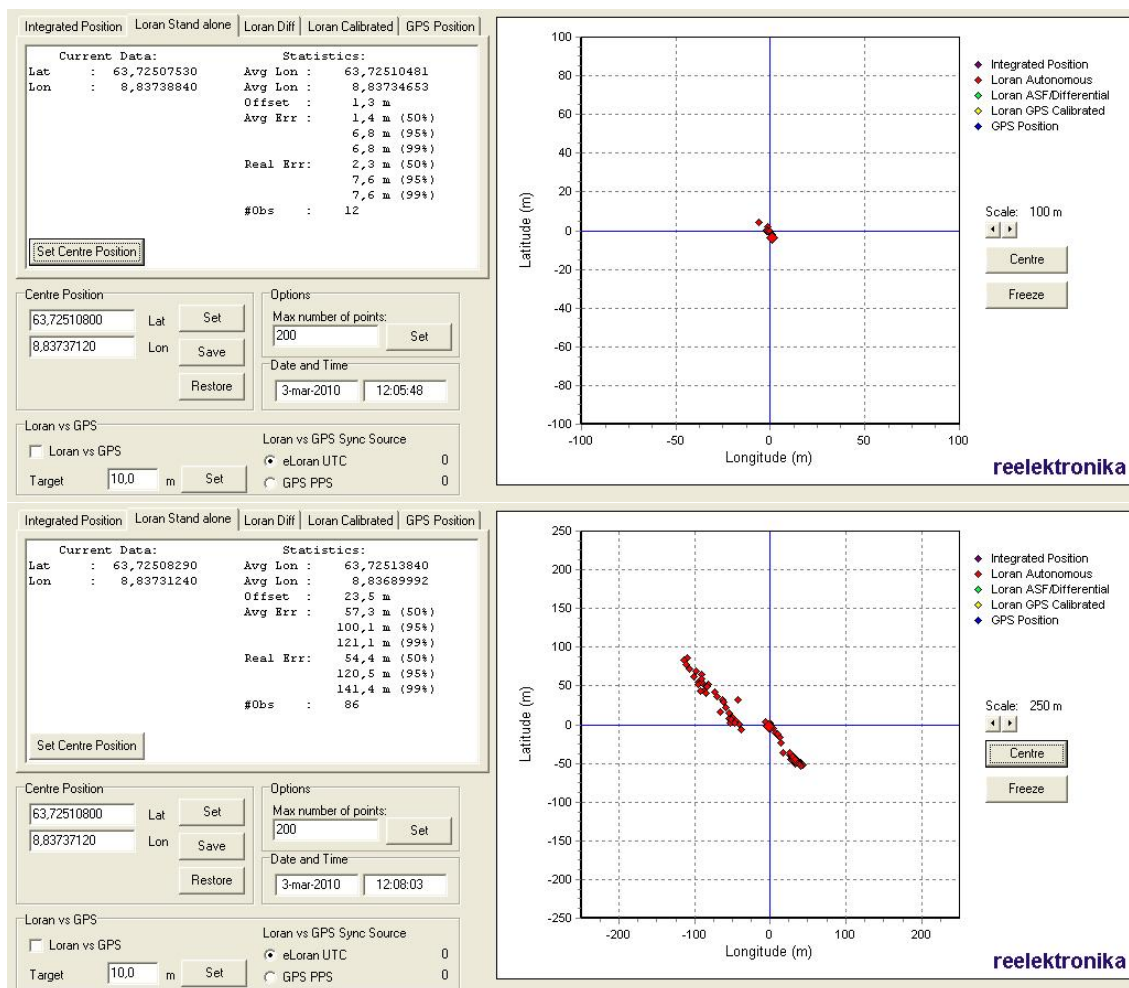


Figur 6-10: Loradd FFT under UB-jamming

Som vist i tabell:6.7 er jam 21 den 26.feb den første jammingen der feilplottet overstiger FRP-kravet (94.5m). Under jammingen øker signalstyrken ved 100kHz med 27dB og støyen i noise loop 1 og to øker med henholdsvis 10.5 og 2.2 dB. Dette er den høyeste verdien for signaløkning ved 100kHz for disse scenarioene, dette skyldes at senderen kun transmitterer en ren tone på 100kHz, og kan yte full effekt på den frekvensen. Ut i fra at mottakeren trenger det høyeste jammesignalet inn på antennen ved bruk av UB kan man si at UB er en dårlig egnet/lite effektiv jammeteknikk. Men tar man hensyn til at transmutering av en frekvens er enklere en de andre modulasjonene så vil observasjonene vise at UB-jamming er en god og effektiv måte å lure/spoofe en LoranC mottaker.

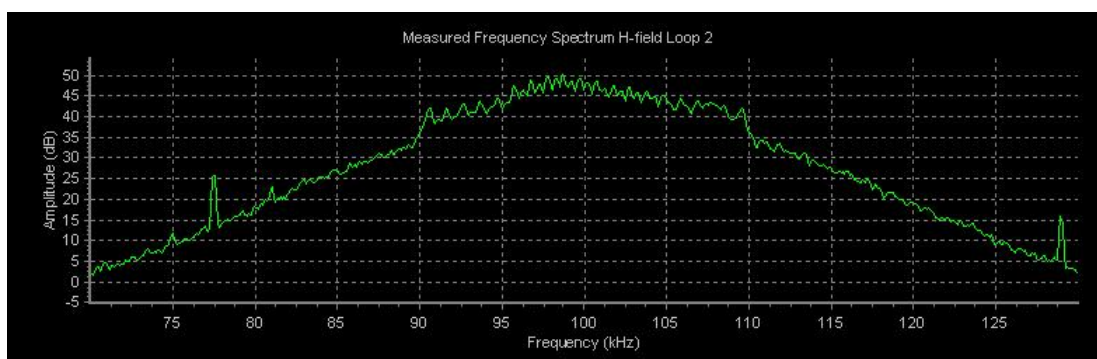
### **Jamming ved bruk av frekvenssveipet bærebølge, FSB**

Jammescenarioene ved bruk av FSB skiller seg ut fra de andre teknikkene. Ved FSB-jamming stopper Loradd mottakeren noen ganger med å oppdatere posisjonen, signalverdiene fra Lorsta og noise loop 1 og 2 varierer i så stor grad at det er vanskelig å sette en verdi som beregningsgrunnlag. FSB-jamming gir også den største degraderende effekten av SNR hos alle tilgjengelige LORSTA. Tar en utgangspunkt i første FSB plott der feil overstiger 90m, er det jam.16 der feilplottet er 100m. Figur:6-11 viser posisjonsplottet til jam16 før og etter jamming.



Figur 6-11: Posisjonsplott før og etter FSB-jamming, jam16

Frekvensspekteret ved denne jammingen er som følgende (6-12):



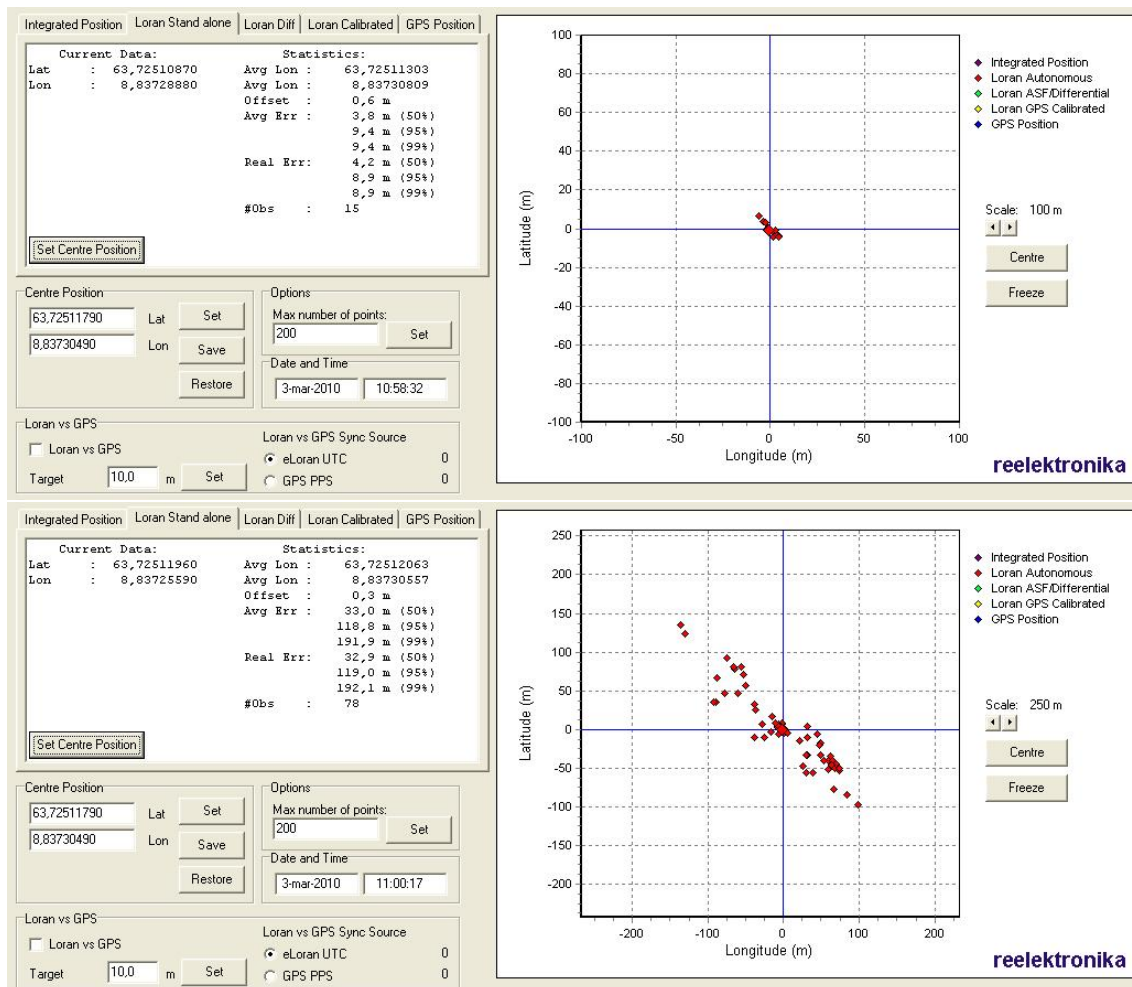
Figur 6-12: Loradd FFT under FSB-jamming, jam16

FSB-jammingen har den laveste signalstyrken ved 100kHz men induserer størst akkumulert støy i noiseloop 1 og 2. Dette stemmer godt med at FSB er bredbåndsjamming der jammesignalet vil interferere med alle GRI frekvenskomponenter i spekteret fra 90 til 110 kHz. Ulempen med denne teknikken er at den er enkel å detektere ved at det

opptrer så store forandringer i alle mottakerens parametre, med andre ord er dette en teknikk som egner seg godt til jamming/hindring av en LoranC mottaker.

## AM Jamming

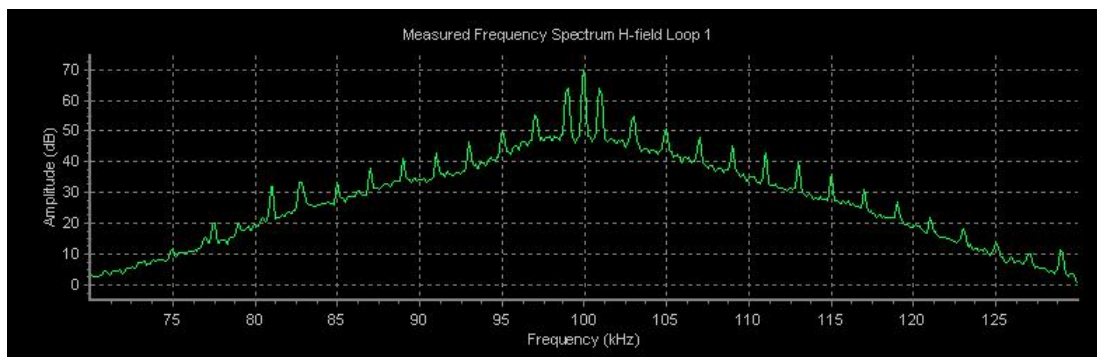
Figur 6-13 viser posisjonsplottet før og etter jamming ved hjelp av AM. Observasjonen er hentet fra jam9 den 26.februar.



Figur 6-13: Posisjonsplott før og etter AM jamming, jam9

Observasjonene viser at graden av feilplott ved AM jamming er avhengig av signalstyrken. Ingen av de andre modulasjonsformene viser en så stor sammenheng mellom signalstyrke ved senterfrekvens og grad av feilplott. Kun 3 av 10 jammescenario overstiger FRP-kravet.

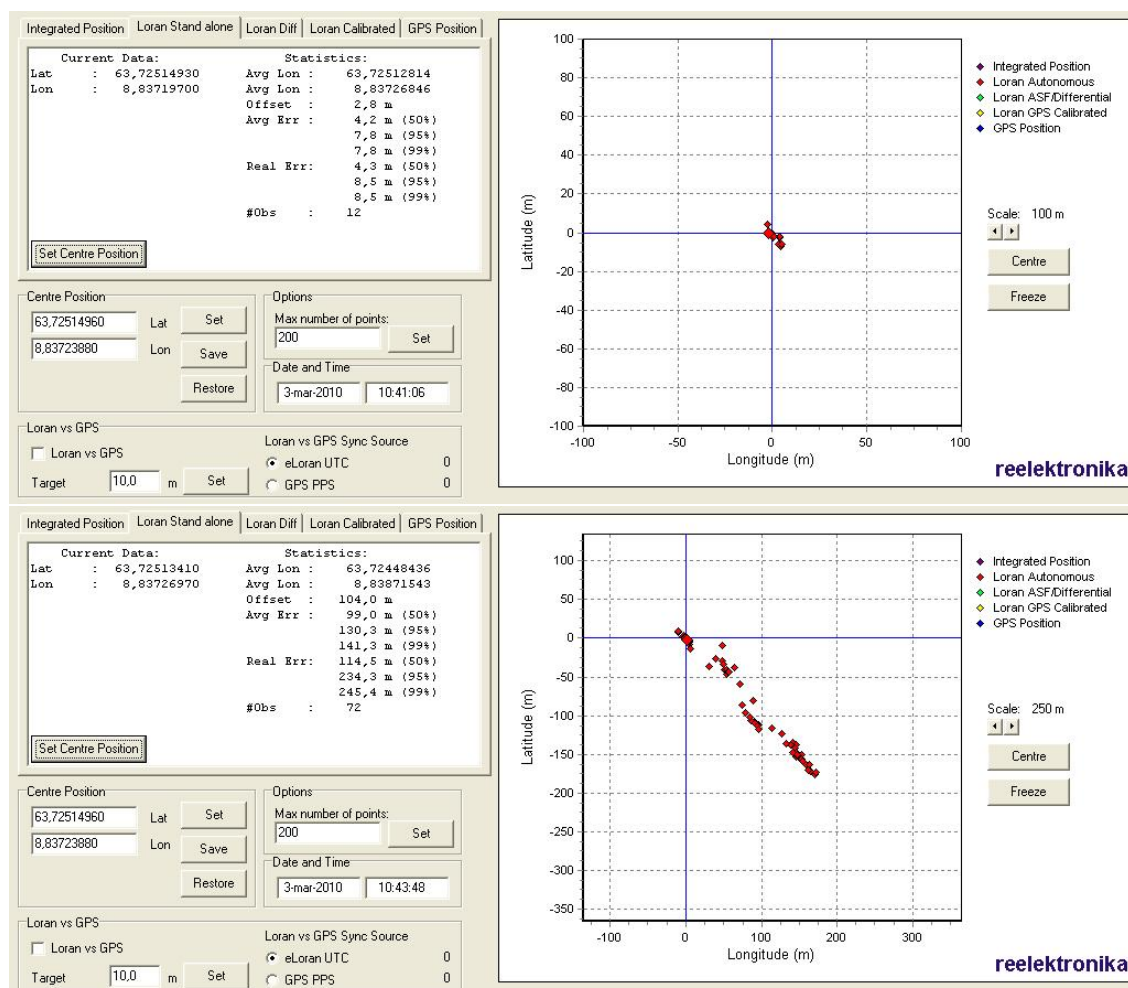
Frekvensspekteret ved denne jammingen er som følgende (se fig:6-14):



Figur 6-14: Loradd FFT under AM jamming, jam9

## FM Jamming

FM-jamming har en lav andel av feilplott over FRP kravet, kun 3 av 10 målinger oversteg 90m feilplott. FM skiller seg ut på grunn av at 2 av de 3 (67%) jammescenarioene som oversteg 90m var ved bruk av magnetisk antenne, mens andelen av magnetisk antenne er 28% totalt for jammescenarioene som overstiger FRP-kravet.

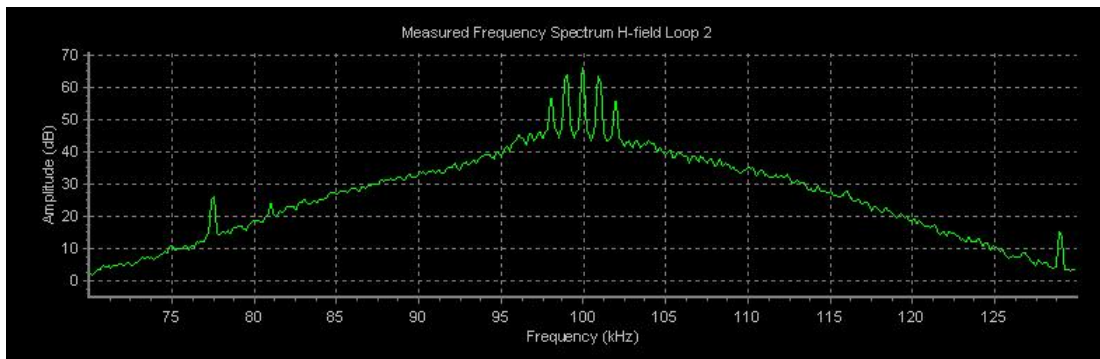


Figur 6-15: Posisjonsplott før og etter FM jamming, jam4



Observasjonene viser at graden av feilplott ved bruk av FM er avhengig av signalstyrken ved 100kHz. Økende signalstyrke på jammesignalet gir økt feilplott, observasjonene viser også at mottakerens oppfattede støy ikke er avhengig av signalstyrken. På grunn av dette er det sannsynlig at posisjonsfeilen skyldes mottakerens problemer med å følge pulsen (tracking) og ikke er et resultat av SNR-degradering.

Frekvensspekteret ved denne jammingen ble som følgende (FFT, Loradd mottaker):



**Figur 6-16:** Loradd FFT under FM jamming, jam4



# 7 Konklusjon, diskusjon og anbefalinger

Dette kapitlet gir en oversikt over de faktorene som påvirker LoranC-systemets robusthet mot interferens og jamming. Videre presenteres det resultater om av hva som skal til for å realisere ett mobilt LoranC-jammesystem ut fra rapportens teoretiske beregninger og praktiske forsøk. Rapporten viser at feltstyrken indikerer hvor kraftig det interfererende signalet må være for å redusere mottakerens SNR slik at det oppstår en jamme- eller narrevirkning. I enkelte tilfeller medføre dette at mottakeren beregner feilaktig posisjon uten at brukeren blir gjort oppmerksom på det.

## 7.1 Bølgeutbredelse

### 7.1.1 Diskusjon, teoretiske beregninger av atmosfærisk støy

Observasjonene av den atmosfæriske støyen viser at den maksimale forskjellen mellom teoretisk og beregnede atmosfærisk støy er 3.5 dB (se figur:6.2). Tar man hensyn til usikkerhet ifm avlesning av instrumentene/måleverdier og at målingene er utført i et begrenset tidsrom vil de teoretiske verdiene og praktiske observasjoner sammenfalle godt. På grunn av dette har rapporten valgt å benytte de teoretiske støyverdiene i de videre beregningene. Målte støyverdier vil i rapporten sees på som en validering av de tidligere beregnede støyverdier. For en videre validering av ITU-støydata må tidsrommet for observasjonene utvides betraktelig.

### 7.1.2 Diskusjon, teoretiske beregninger av feltstyrke

**Sommerfeld og Norton** Metodene utviklet av Sommerfeld og Norton er nevnt i denne rapporten kun som et grunnlag for de teoriene som senere ble utviklet av Eckersley og Millington.

**Eckersleys metode** Ut fra observasjoner utført i denne rapporten ser det ut som at Eckersleys metode er unøyaktig når utbredelsesveien består av homogene deler der det er en kraftig variasjon i ledningsevnen. Videre tar ikke denne metoden hensyn til

etterfyllingseffekten når en RF-bølge propagerer over områder med ulik ledningsevne. Eckersley tar heller ikke hensyn til prinsippet om resiprositet (se kap 4.5.7). Eksisterer bølgen kun i et begrenset område, f.eks i lav høyde over jordens overflate, vil signalforholdene samsvare godt med det som er beskrevet i Eckersleys metode/teorier. Transmisjonen ville da være forholdsvis lik transmisjon i en ikke-homogen transmisjonslinje, der graden av dempning i hver homogen del av linjen ville være lik en konstant for den aktuelle delen og være uavhengig av den forrige linjedelens dempning.

**Millingtons metode** Ut fra sammenligning av observerte og beregnede SNR verdier er det Millingtons metode som sammenfaller best med de observerte verdiene. I denne rapporten benyttes primært Millingtons metode for beregning av teoretiske signalverdier fra LORSTA. Bruken av Millingtons metode i denne rapporten viser at det er mest effektivt å ha god ledningsevne til terrenget de første kilometerene fra en sender (LORSTA eller jammer, se figur:4-11).

**Teoretisk vs. observert SNR** For beregninger av signalstyrke over en homogen overflate (sjø for Ejde og Jan Mayen) gir de teoretiske beregningene en for optimistisk feltstyrke for LoranC-signalene (se tabell: 6.3)). Ettersom denne rapporten ser på resultatet av jamming som en forverring av SNR hos mottakeren og observering av hvordan mottakeren reagerer under slike forhold, vil ikke forskjellen på teoretisk og målt SNR ha noen påvirkning på rapportens resultat. Graden av reduksjon av SNR er ikke en absolutt verdi, men en reduksjon i forhold til normal drift av mottaker med feil som er innenfor systemets spesifikasjoner. Forskjellen på den teoretiske beregningen og de observerte/målte SNR-verdier behandles som en observasjon og en forskjell som rapporten ikke finner noen forklaring på.

## 7.2 Tilsiktet interferens

Med utgangspunkt i observasjonene utført under jammemålingene er det helt klart at LoranC mottakeren i måleoppsettet ble påvirket på en slik måte at posisjonsnøyaktigheten ble redusert. Observasjonene viser at mottakeren ble påvirket slik at posisjonsfeilen økte fra 8m, i referanse målingen, til 307m i jam.23 den 26.feb.

### 7.2.1 Signaler brukt til tilsiktet interferens

#### **Virkning av noen signaltypene på LoranC mottakeren, de mest effektive signaltypene**

**Umodulert bærebølge, UB** Den praktiske målingen viser at UB gav de største posisjonsfeil. UB-jamming hadde også de fleste scenarioene med posisjonsfeil som over-

steg FRP kravet på 18-90m. Grunnen til dette er nok en kombinasjon av at jammerenheten kan konsentrere all effekt i den umodulerte bærebølgen, og at en 100kHz UB vil kunne interferere med alle GRIs spektrallinjer. Dette på grunn av at 100kHz er den eneste frekvensen der alle GRI har en spektrallinje. Ettersom mottakeren fortsatte å oppdatere posisjonplottet under jamming og ikke presenterte noen som helst feilmelding, betraktes denne påvirkningen som narring.

**Frekvenssveipet bærebølge, FSB** FSB viste seg å være den mest effektive formen for jamming (les. hindring). Det var kun ved bruk av FSB at LoranC mottakeren gikk i "lås" slik at mottakeren ikke oppdaterte posisjonsplottet eller kun ga sporadisk oppdatert posisjon (ikke hvert 5. sek som under normale forhold). FSB ga størst grad av detektert støy i mottakeren, dette resulterte i en betraktelig degradering av SNR. Den kraftige støyen i mottakeren antas å forklare hvorfor mottakeren gikk i "lås". SNR verdiene ble så lave at mottakeren mistet følgingen av det innmodulerte 100kHz-signalet og fikk problemer med deteksjon av LoranC-pulsene

**AM** Bruk av AM signal ga den beste sammenhengen mellom signalstyrke ved 100kHz og mottakerens posisjonsfeil. Igjen kan det virke som om at mottakerens grad av påvirkning er i størst avhengig av hva som "treffer" spektrallinjen ved 100kHz. Ved bruk av AM er det kun 3 av 10 jammescenario der mottakers feil overgår FRP kravet.

**FM** I likhet med AM er dette en modulasjonsform som kun i en begrenset form påvirket mottakeren under testing. Her var det også bare 3 av 10 jammescenarioer som oversteg FRP kravet. FM utmerket seg på den måten at de mest effektive jammescenarioene var ved bruk av magnetisk antenne. Dette kan ha sammenheng med at den benyttede teleskopantennen ga kun en merkbar støyøkning i antennesløyfe nr. 1, mens den magnetiske antennen påvirket begge antennesløyfene. Det at magnetantennen påvirket begge sløyfene kan være grunnen til at den ga størst posisjonsfeil i mottakeren.

**Oppsummering, signaler** Observasjonene tyder på at UB er den mest effektive signaltypen for tilsiktet påvirkning av en LoranC mottaker. Dette kan ha sammenheng med at en sender kan konsentrere full effekt i dette umodulerte signalet og at det vil påvirke spektrallinjer til alle LoranCs GRI (les. alle kjeder). Observasjonene tyder også på at synkron og nær-synkron påvirkning er det som i størst grad påvirker en mottaker. Den asynkrone påvirkningen har liten eller ingen effekt på mottak og følging av LoranC pulsene.

Testen viser at mottakeren ble jammet (ingen posisjonsangivelse) ved bruk av FSB-signaler, mens ved AM, FM og UB viser mottakeren typiske tegn av å være påvirket av narring (spoofing). Ut fra analysen kan det virke som at nålefilterne ikke fullt ut greier å filtrere aktuell påvirkning/jamming. Dette er kun en antagelse da det ikke har vært mulig å innhente detaljert informasjon om Loradd-mottakerens nålefilter.

## 7.3 Komponentene i et mobilt jammeoppsett.

### 7.3.1 Transmitter/forsterker

#### Teoretisk beregning av transmitter

Ut i fra teoretiske beregnede feltstyrkeverdien for LoranC, grad av atmosfærisk støy og intensjonelle påvirkning fra jammeutstyret ser man ut fra tabellene i avsnitt 5.2 hvor mye utstrålt effekt som må påtrykkes jammeantennen (valgt monopolantenne) for at SNR ved mottakeren skal påvirkes/reduseres. Tabellene tar utgangspunkt i at SNR ved mottakeren skal påvirkes på en slik måte at SNR blir dårligere enn -10dB.

For at den mobile jammerenheten skal kunne unngå å bli visuelt oppdaget bør avstanden mellom jammer og mål være minimum 20km. For å interferere LORSTA Bø, Jan Mayen og Ejde (9007kjeden) der havet er utbredelsesveien, viser beregningene at jammerenheten må utrustes med en sender med utgangseffekt på henholdsvis 83kW, 2,5kW og 17,8kW. For så å bli jammet, garantere en suksessfull jamming, SNR lavere enn -10dB, må da den mobile jammerenheten utstyres med en 83kW transmitter.

I følge en produsent av slike transmittere<sup>1</sup> vil en sender på 190kHz med utgangseffekt på 1.6kW ha en egenvekt på 380kg. Denne senderen krever videre en strømforsyning som kan produsere 2300W ved 220VAC. Vekt/størrelsen av en slik 83kW transmitter og kravene til strømforsyning vil gjøre transmitteren så fysisk stor/tung at jamme-enheten ikke lenger kan betraktes som et mobilt-system.

Fra tabellene i kap 5.2 kan jamming av Lorsta Jan Mayen og Ejde la seg gjøre innenfor en radius på ca 5km. En avstand mellom jammerenhet og mål på 5km krever en transmitter med utgangseffekt på henholdsvis 0.5kW og 3kW. En slik transmitter kan være en komponent i et mobilt jammesystem med en effektiv radius på 5km i et område der LoranC- signalene har samme fektstyrke som målt på Frøya. For å gi en best mulig effektoverføring bør transmitteren ha en karakteristisk systemimpedans som antennen kan tilpasses til (vanlig; 50 eller 300  $\Omega$ ).

Er målet helt i ytterkant av dekningsområdet for LoranC vil det mest sannsynlig kreve mindre effekt fra en jammer enn hva som er vist i denne rapporten. Her er det en klar sammenheng mellom målets avstand til LORSTA og hvor effektivt dette målet kan jammes/lures. Denne sammenhengen viser videre at en utplassering av flere LORSTA, gjerne med mindre utgangseffekt enn hva brukt i dag, vil gi en forbedring av systemets robusthet.

---

<sup>1</sup>Tele supply A.S, Fetsund No; Model TS-23

### 7.3.2 Jammeantenne

Resultatet av utført teoretisk antenneberegning viser at en mobil LoranC antenne vil ha de samme egenskapene som man kan forvente seg av en elektrisk liten senderantenne. Strålingsdiagrammet til antennen er likt strålingsdiagrammet til en elektrisk liten vertikal monopolantenne med en virkningsgrad/effektivitet i området rundt noen få titalls promille.

Rapporten viser også at man kan oppnå god forbedring av virkningsgraden/antennens egenskaper ved å benytte en top-hat. Top-hat'en gir en forbedring av antenneeffektiviteten med ca.5 dB. Videre kan man fastslå at antennen er i stor grad avhengig av ytre tap, slik at hvor antennen plasseres og bakkens ledningsevne viser seg å være meget avgjørende.

Resultatene gitt i tabell:4.1 indikerer at en liten økning av antennelengden gir en stor forbedring av antenneeffektivitet. Analysen viser at en antenne med lengde på 12m er dobbelt så effektiv som en antenne med lik design og en lengde på 9m, grunnen til den økte effektiviteten er en kombinasjon av forbedret/økt strålingsmotstand og den reduserte tapsmotstanden. Rapporten fastslår videre at en 12m høy antenne er en antenne som er helt i den fysiske yttergrensen for hva som kan være en del av et mobilt jammesystem. Det ble også vist at den mobile jammeantennen har en realiserbar virkningsgrad som er betydelig mindre enn systemets egen virkningsgrad (LORSTA) (se tabell:4.1).

**Beregninger viser at i et langbølgesystem, som LoranC, er det er meget vanskelig å realisere en mobil jammeantenne med god virkningsgrad.** Den optimale jammeantennen beregnet i denne rapporten har en virkningsgrad på 0.06 %. Observasjonene viser at monopolantennen er den mest effektive jammeantennen i dette oppsettet. Monopolantennens stråling (feltstyrke) er ca. 3 til 6 dB kraftigere enn den magnetisk antennen (samme signaltype, frekvens og signalstyrke).

## 7.4 Oppsummering av konklusjon, er LoranC et robust navigasjonssystem?

En storskala måling med den valgte jammeantennen og med de beregnede sendereffektene ville ha vært den optimale testen om at LoranC virkelig er et robust navigasjonssystem. Men på bakgrunn av småskalaforsøket samt de teoretiske beregningene har denne rapporten konkludert med:

**Teoretisk analyse** Den teoretiske analysen utført i denne rapporten viser at oppsettet av en mobil jammerenhet som skal kunne operere utenfor det visuelle området til en LoranC mottaker vil kunne gi store utfordringer. Disse utfordringene skyldes i all hovedsak de relativt sterke signalene fra LORSTA og systemets lave frekvens (lang bølgelengde). De sterke signalene fra LORSTA tilsier at jammerenhetens transmitter

vil bli fysisk stor/tung og kreve en kraftig strømforsyning for å generere tilstrekkelige jammesignaler inn på antennen.

Systemets lave frekvens vanskeliggjør konstruksjon av en jammeantenne med god effektivitet og som samtidig kan inngå som en del av et mobilt jammesystem. Selv om antenneeffektiviteten kan forbedres ved forskjellige typer tilpasninger og kapasitive laster viser analysen i denne rapporten at effektiviteten til den mobile antennen ikke vil kunne overstige 0.1%.

**Praktisk analyse** Den praktiske analysen viser at en LoranC mottaker kan jammes/narres. Observasjonene av de forskjellige signaltypene gir ulik mottakerrespons. Ved jamming vha FSB "låses" mottakeren mens ved jamming vha FM, AM og UB responderer mottakeren likt med det som kan forventes ved narring. Ved denne narringen gir mottakeren feil posisjonsangivelse uten at mottakeren varsler på noe som helst måte om denne feilen. En forbedring av mottakerens nålefilter ville kunne ha rettet på den induserte posisjonsfeilen. Med grunnlag i at observasjonene viser at mottakeren er mest sårbar for synkron-interferens vil det gi mest virkning at nålefiltrene ikke kun detekterer amplituden til det interfererende signalet, men også hvor det interfererende signalet befinner seg i frekvensbåndet. Et interfererende signal med frekvensen 100kHz vil mest sannsynlig kunne gi en større grad av feil sammenlignet med et signal på en annen frekvens med en noe høyere amplitude.

Denne rapporten konkluderer med at den optimale bruken av nålefiltere bør følge disse to prinsippene:

1. Detekter og filtrer alle synkrone og nær-synkrone signaler med moderat til høy amplitude.
2. Detekter og filtrer asynkrone signaler med veldig høy amplitude.

Den praktiske målingen er kun utført i en begrenset tidsperiode. For å danne et bedre grunnlag for resultater gitt bør det utføres flere slike målinger ved forskjellig årstid/tidspunkt. Under jammingen var den største avstanden mellom jamme- og LoranC antennen 16m, fra antenneteorien vil LoranC-antennen befinne seg i jammeantennens nærfelt. At LoranC antennen er i nærfeltet betyr at man ikke kan forvente en stabil bølgeforplantning<sup>2</sup> mellom antennene og effektoverføringen betraktes foregå via en induktiv kopling.

Formålet med jammingen er å påvirke mottakeren ved å interferere med eksisterende LoranC signaler inn på mottakerantennen. Om denne påvirkningen kommer fra en induktiv kopling mellom antennene eller fra en stabil bølge(bølge i fjernfeltet) vil det ikke ha noen betydning for resultatene i denne rapporten. Resultatene er et produkt av den observerte påvirkningen inn på mottakerantenne og hvordan mottakeren påvirkes.

---

<sup>2</sup>E- og H-feltet vil være stabile i forhold til hverandre

**Praktisk vs. teoretisk analyse** Den praktiske og teoretiske analysen viser at LoranC mottakeren lar seg påvirke av jamming/narring. Videre viser beregningene at et mobilt jammesystem som skal kunne påvirke en mottaker av en slik grad vil ha et betydelig omfang. Egenskapene hos LoranC-systemet som gjør dette vanskelig er; systemets lave frekvens (langbølge), LORSTA med stor utgangseffekt og det faktum at et jammesystemets mobilitet og effektivitet er motstridende og vil begrense hverandre.

**Rapporten konkluderer med at LoranC er et robust navigasjonssystem fra en vurdering av absolutt robusthet.** Rapporten har ikke omhandlet tilsvarende sårbarhet ved GNSS, derfor er en direkte sammenligning av LoranC og GPS/GNSS ikke utført her. **Fra artikler og publiserte forsøk som omhandler tilsvarende sårbarhet ved GNSS er det mye som tyder på at LoranC (eller eLoran), i dekningsområdet til LoranC, er et robust navigasjonssystem også sammenlignet med GNSS.**

Analysis tools



# 8 Vedlegg A; Måleutstyr, jamming Frøya

## 8.1 HP 33120A Function Generator



### HP 33120A Function/Arbitrary Waveform Generator

Create custom waveforms easily and affordably

- 15 MHz sine and square wave outputs
- Sine, triangle, square, ramp, noise and more
- 12-bit, 40MSa/s, 16,000-point deep arbitrary waveforms
- Direct Digital Synthesis for excellent stability

#### Uncompromising performance for standard waveforms

The HP 33120A function/arbitrary waveform generator uses direct digital-synthesis techniques to create a stable, accurate output signal for clean, low-distortion sine waves. It also gives you fast rise- and fall-time square wave, and linear ramp waveforms down to 10 mHz.

#### Custom waveform generation

Use the HP 33120A to generate complex custom waveforms such as a heartbeat or the output of a mechanical transducer. With 12-bit resolution, and a sampling rate of 40 MSa/s, the HP 33120A gives you the flexibility to create any waveform you need. It also lets you store up to 16,000-deep waveforms in nonvolatile memory.

#### Easy-to-use functionality

Front-panel operation of the HP 33120A is straightforward and intuitive. You can access any of ten major functions with a single key press or two, then use a simple knob to adjust frequency, amplitude and offset. To save time, you can enter voltage values directly in Vp-p, Vrms or dBm. Internal AM, FM,

FSK and burst modulation make it easy to modulate waveforms without the need for a separate modulation source. Linear and log sweeps are also built in, with sweep rates selectable from 1ms to 500s. HP-IB and RS-232 interfaces are both standard, plus you get full programmability using SCPI commands.

#### Optional phase-lock capability

The Option 001 phase lock/TCXO timebase gives you the ability to generate synchronized phase-offset signals. An external clock input/output lets you synchronize with up to three other HP 33120As or with an external 10-MHz clock.

Option 001 also gives you a TCXO timebase for increased frequency stability. With accuracy of 4 ppm/yr, the TCXO timebase makes an HP 33120A ideal for frequency calibrations and other demanding applications.

With Option 001, new commands let you perform phase changes on the fly, via the front panel or from a computer, allowing precise phase calibration and adjustment.



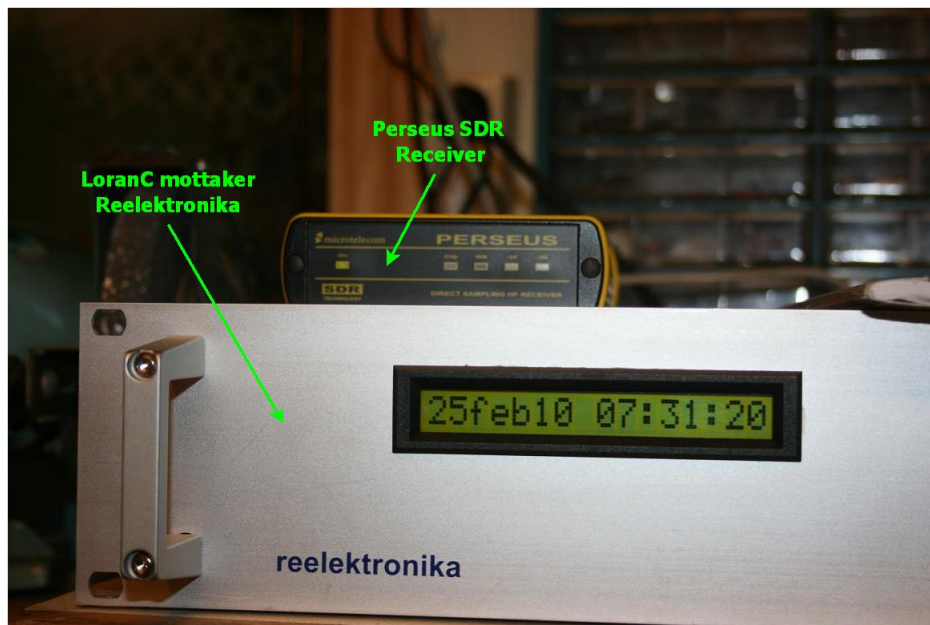
#### Link the HP 33120A to your PC

To further increase your productivity, use the HP 33120A in conjunction with HP 34811A BenchLink Arb software. The Windows<sup>®</sup>-based program lets you create and edit waveforms on your PC and download them to your HP 33120A with the click of a mouse. Create complex waveforms in a math or statistics program—or use the freehand drawing tool—then pass them into HP BenchLink Arb. Use in conjunction with HP BenchLink Scope, the software also lets you capture a waveform with your HP oscilloscope or DMM and send it to your HP 33120A for output.

#### 3-year warranty

With your HP 33120A, you get operating and service manuals, a quick reference guide, test date, and a full 3-year warranty, all for one low price.

## 8.2 LORADD LORANC/UTC receiver, s/n 100037, HW rev 1.0



Figur 8-1: LoranC mottaker og SDR, front

**LoranC mottaker, Reelektronika** Benyttede LORADD eLoran/UTC mottaker fra Reelektronika er en LoranC mottaker som har sin hovedfunksjon til å gi informasjon om riktig UTC-tid og frekvens. Loradd UTC enheten skal i følge Reelektronika kunne yte lik funksjonalitet mtp posisjons angivelse som hos en integrert navigasjons enhet<sup>1</sup>. Enheten opererer i All-in-view modus<sup>2</sup>. Informasjon innhentet fra GPS/LoranC signaler vil samples/oppdateres hvert sekund. En forutsetning for at riktig UTC tid skal kunne innhentes er at mottakeren har mulighet til å innhente signaler fra en LORSTA som sender Eurofix signaler. P.d.d er det ingen LORSTA i Norge som sender Eurofix signaler<sup>3</sup>, eneste stasjonen som det kan innhentes Eurofix signaler fra under denne målingen var LORSTA 7499(M) Sylt, Tyskland.

Mottakeren har følgende indikatorer/display:

- 16 karakters LCD display som viser UTC dato og tid.
- Power indikator.
- Status lys, indikerer at mottakeren har låst på signalet fra valgt UTC stasjon, og har låst sin interne klokke til denne tidsreferansen.

<sup>1</sup>ref. Operation manual, Reelektronika.

<sup>2</sup>se forprosjekt(Ohren 2009)

<sup>3</sup>FLO/IKT jan 2010

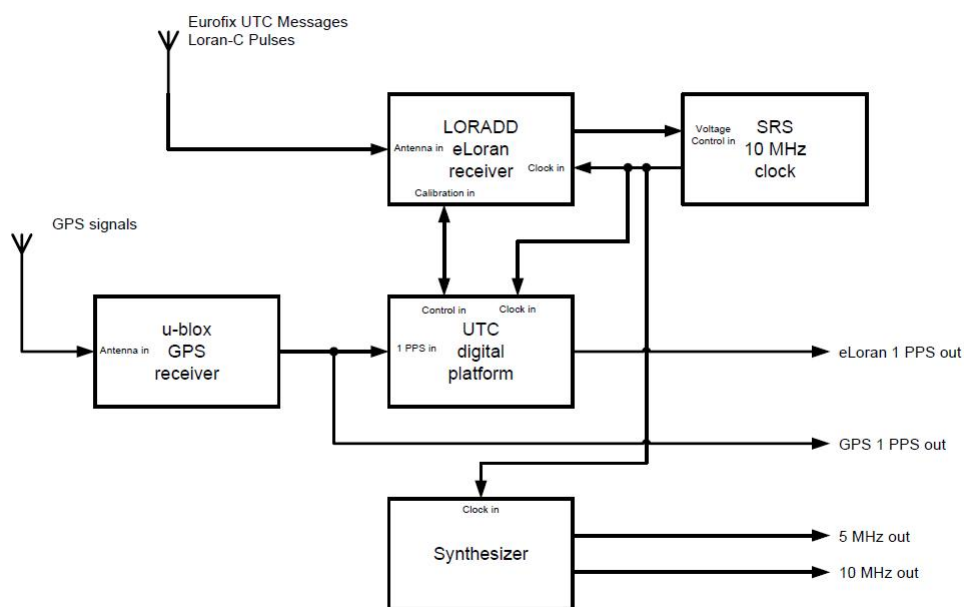
- 1PPS<sup>4</sup> GPS lys, indikerer at GPS mottakeren har innhentet et riktig antall satellitt signaler.
- 1PPS eLoran lys, indikere at mottakeren har mottatt UTC melding fra UTC stasjonen.

### Spesifikasjoner

LoranC mottakeren består av følgende komponenter:

- Reelektronika LORADD OED eLoran mottaker.
- Motorola M12+ GPS mottaker
- En Stanford Research Systems 10 MHz Oscillator SC10([www.thinksrs.com](http://www.thinksrs.com))

Figur 8-2 viser et blokkdiagram over alle hovedkomponentene hos LoranC mottakeren. Loradd mottakeren er hovedenheten, den mottar LoranC signalene og dekode UTC informasjonen. Som egen frekvenskilde/lokal oscillator benyttes SRS<sup>5</sup> 10MHz klokken. Denne klokken styres av frekvensen til LoranC signalet som hentes ut fra mottatte LoranC pulser. Mottakeren benytter SRS sin gode stabilitet innenfor korte tidsrom mens mottatte LoranC pulser benyttes for å sikre kravene til tids/frekvens stabilitet over lengre tidsrom(kravet er innenfor UTC tid= $1\mu s$ ).



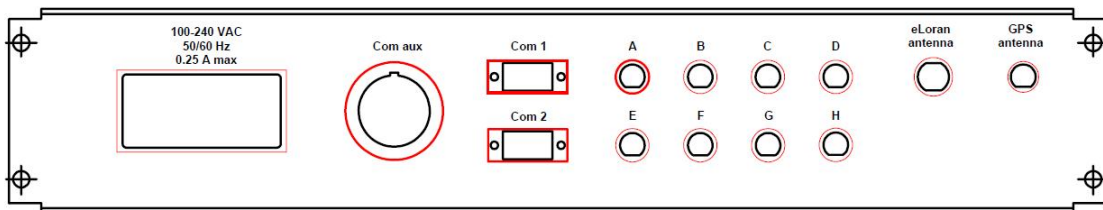
**Figur 8-2:** Blokkdiagram LORADD LoranC mottaker, kilde: Reelektronika

På baksiden av Loradd mottakeren(se fig:8-3) er de forskjellige tilkøplingene/grensesnittet til mottakeren plassert. GPS antennen koples til mottakeren via en TNC konnektor og

<sup>4</sup>1 Pulse per second fra posisjonsenhenten

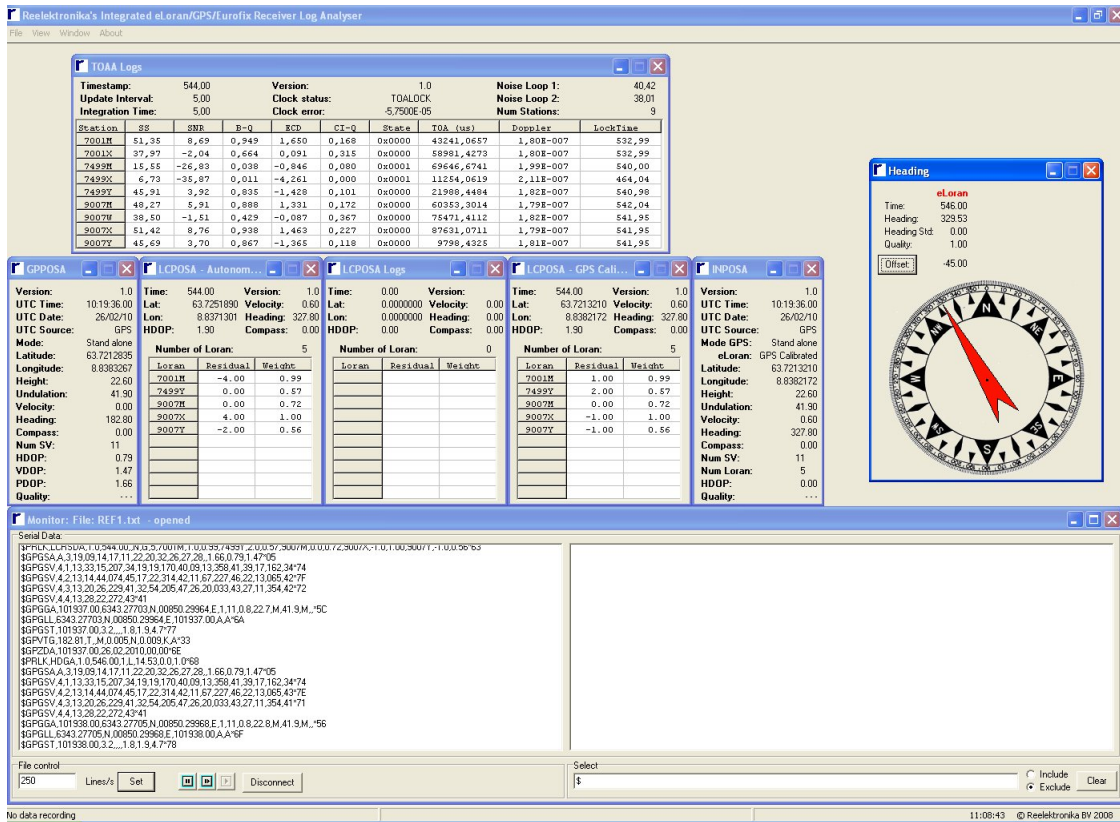
<sup>5</sup>Stanford Research Systems

eLoran H-antennen koples til via en 8-pin LEMO 1B.308 konnektor. Portene for seriekommunikasjon (Com 1-2) benyttes for kommunikasjon med PC og er internt i mottakeren koplet direkte til LoranC prosessoren. Mottakeren har også 8 BNC utganger, disse er for frekvens og PPS signaler og vil ikke bli benyttet under målingene i denne rapporten.

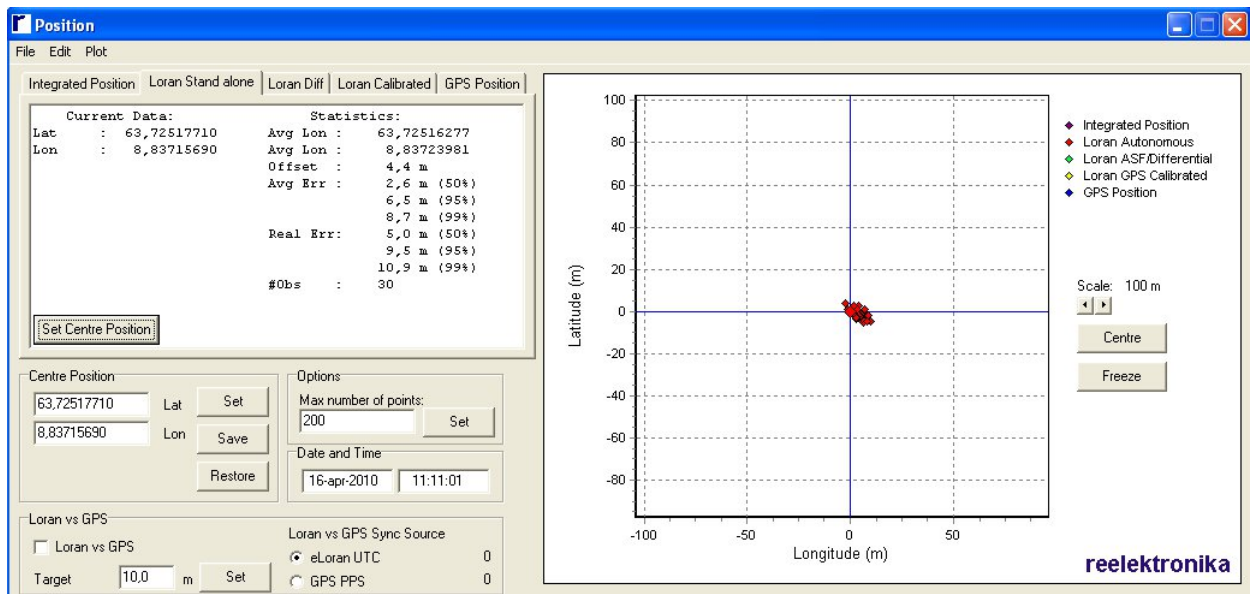


**Figur 8-3:** Tilkoplinger LoranC mottaker, bakside

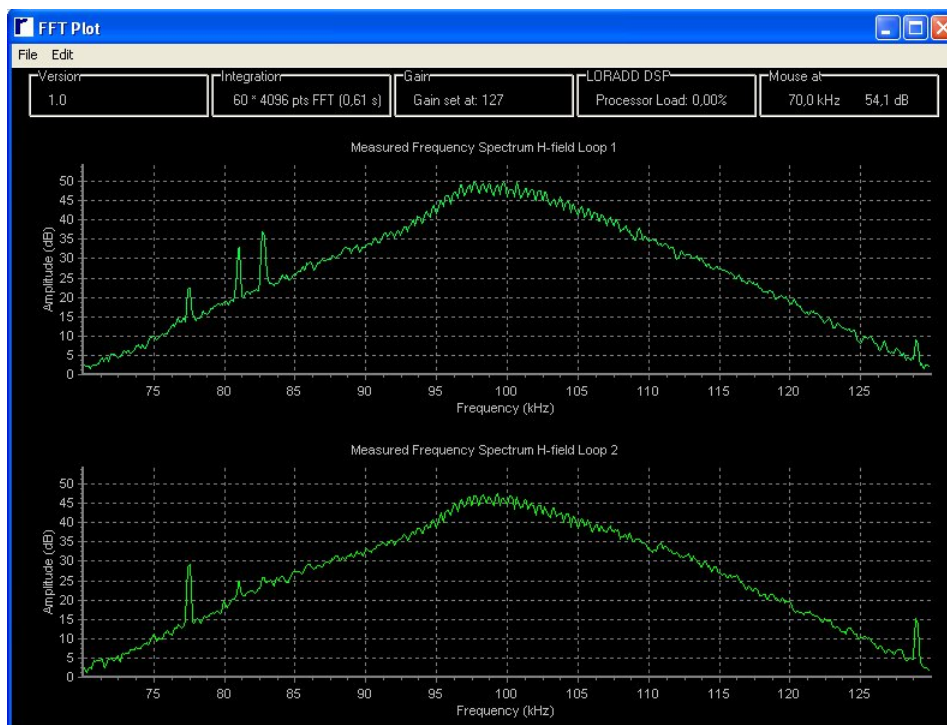
**Presentasjon av posisjonsdata, Loradd mottaker** Som vist i figur 8-1 har denne mottakeren fra Reelektronika ingen display som viser posisjonsdata fra selve enheten. For å hente ut posisjonsdata må man benytte en PC med programmet LERXanalyser installert, dataoverføringen skjer via en tilkobling fra PC til mottakerens serieport. LERXanalyser er et program utviklet av Reelektronika for presentasjon og overvåking av data fra mottakeren. LERXanalyser gir tilgang til mange forskjellige parameter til mottakeren, se figur:8-4. Vinduet *TOAA Logs* gir en presentasjon parametrene til mottatt LoranC pulser fra de respektive LORSTA. I denne rapporten danner disse data grunnlag for hva som skjer med SNR i mottakeren under jamming. Softwaren muliggjør også en grafisk fremstilling av posisjonsdata samlet hvert 5 sekund. Dette vinduet er merket *Posistion* og gir et scatterplot over mottakerens posisjonsberegning ut i fra mottatte LoranC pulser, se figur:8-5. Det siste vinduet av betydning i denne rapporten er vinduet som presenterer signal spektrumet fra 70-130KHz mottatt av Loradd antennen. *Spektrum* vil bestå av to plot, se figur:8-6, dette på grunn av at antennen består av to H-antenner plassert med en vinkel på 90grader i forhold til hverandre.



Figur 8-4: Grafisk presentasjon, LERXAnalyser



Figur 8-5: Posisjonsplott, LERXAnalyser



Figur 8-6: Signalspektrum 70-130KHz, LERXanalyser

### 8.3 LORADD H-field eLoran and GPS patch antenna.

Utdrag fra LORADD manual ver 1.1.

Every UTC receiver comes with its own H-field eLoran antenna. The receiver and antenna should be considered as one. Changing antennas from one receiver to another is not recommended and may produce sub-optimal results. Please contact reelektronika in case you need to change the antenna-LORADD receiver combination.

The eLoran antenna is integrated with a GPS antenna. If the antenna is used in a location where GPS reception is not optimal a separate GPS antenna can be connected. For installation of the antennas the following guidelines have to be taken into account:

- The H-field eLoran antenna needs to be installed in a location free from interference in the 100 kHz frequency range, such as computer monitors, processors, power supplies or other electrical equipment, spark ignition engines or engine alternators. The presence of these noise sources may limit the performance of eLoran in your receiver. Further, antenna installation close to large metal objects might have a negative influence on the accuracy of reception of eLoran signals.
- The GPS antenna needs to be installed with a clear and unobstructed view at the sky, free from any objects which may reflect satellite signals to the antenna. Also, the antenna should not be installed close to equipment which may cause interference in the 1 GHz frequency range, such as TV and radio receiving and broadcasting antennas as well as radar equipment. In case both eLoran





**Figur 8-7:** H-field antenne with GPS patch included

and GPS signals are coming from the integrated eLoran/GPS patch antenna the installation has to be performed taking both guidelines into account. The arrow of the antenna housing need not be pointed in any particular direction in case of static operation. In dynamic applications, the H-field antenna allows determination of real headings even without movement of the vehicle. For eLoran signal environment analyses the receiver is capable of outputting received spectrum (FFT) plots of both H-field loops, through the FFTA log, which can be made visible through the LERXAnalyser software tool. See Section 4 for more information on this log. The eLoran antenna and GPS antenna are active antennas. Therefore, the LORADD receiver outputs +5 V DC on pen 6 of the eLoran antenna connector and +3.3 V on the

## 8.4 PERSEUS 10 kHz to 30 MHz RECEIVER, Microtelecom s.r.l. Pavia di Udine, Italy

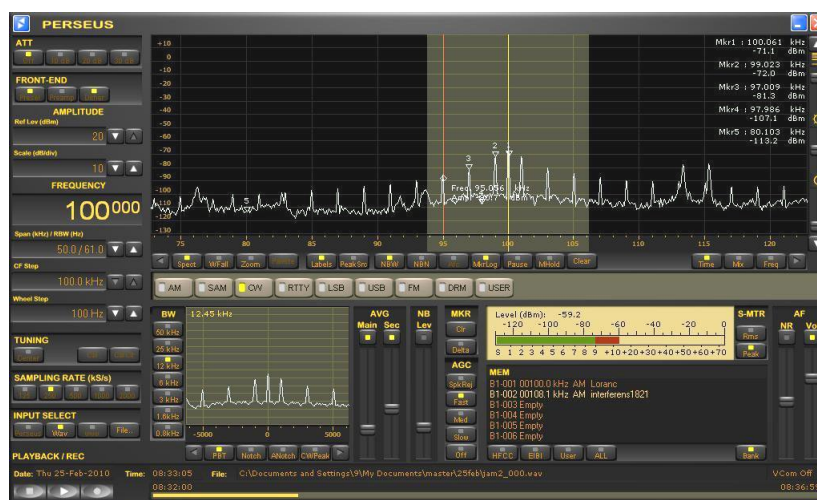


**Figur 8-8:** TilkoPlinger SDR, bakside

### Bredbånds SDR, Perseus

**RF Mottaker Perseus, Microtelecom** I måleoppsettet er det benyttet en bredbånds SDR<sup>6</sup> for opptak atmosfærisk støy, LoranC pulser/signalstyrke og overvåkning av jamme signalet. SDRen er produsert av Microtelecom Italia, og har fått navnet PERSEUS. PERSEUS er en software definert VLF-LF-MF-HF radio med frekvensområde fra 10 kHz til 30 MHz, den har også mulighet for å gjøre opptak av RF-spektrum opp til båndbredde BW=800kHz. Den har innebygget en 14 bit 80 Ms/s analog til digital konverter, en FPGA basert nedskalering og et USB 2.0 grensesnitt til PC. Den analoge inngangs kretsen har en 0-30dB dempningskrets, en 10 bånd filter bank samt en forforsterker. Tilkoplingen til antennen er en BNC hunn-kopling og driftspenningen er 5VDC (se fig:8-1). Enheten leveres med en switchpower kraftforsyning. Denne viste seg å støye i en så stor grad så denne ble skiftet ut med en lineær kraftforsyning.

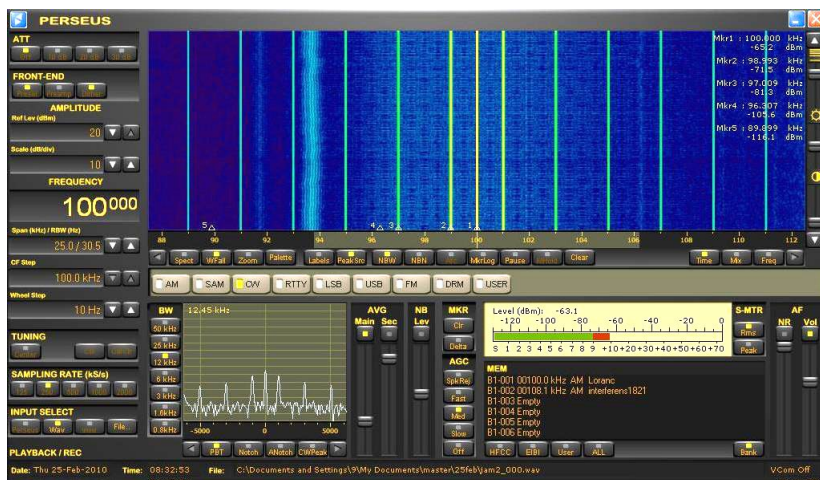
Softwaren for styring av Perseus er utviklet av Microtelecom og er av versjon 1.1. TabletPC ble benyttet for lagring og overvåkning av data innhentet av Perseus, koplet via USB. SDR ble satt fast til senter frekvens 100KHz og overvåket et frekvens bånd på ca 50KHz under målingene (75-125KHz). Softwaren til Perseus viser signalene i to display, et der det ønskede frekvensbåndet (justerbart) vises enten i *waterfall* (se fig:8-10) eller i *spectrum* modus (se fig:8-9) (hovedvindu) og et av den valgte senterfrekvensen og med presatt båndbredde (lille vinduet nede til venstre). Det er kun i hovedvinduet i spektrum modus en kan få signal verdier (venstre side), de andre måtene å vise signalene på inneholder ikke informasjon om signalstyrke, der kun frekvensen kan avleses. For å registrere signal verdiene må en sette markører på ønskede frekvenser og logge disse for en valgt periode. Øyeblikks verdien for markørene kan også avleses direkte fra hovedvinduets høyre side. Frekvens og signalstyrke [dBm] for de valgte markørene blir logget hver sekund til en .txt fil som senere kan avleses. Eksempel på Perseus .txt logfil er vist i tabell:8.1. I denne rapporten er det logget .txt fil for alle signaltyper/jamme scenario.



Figur 8-9: Perseus software display i spectrum modus

<sup>6</sup>Software Defined Radio



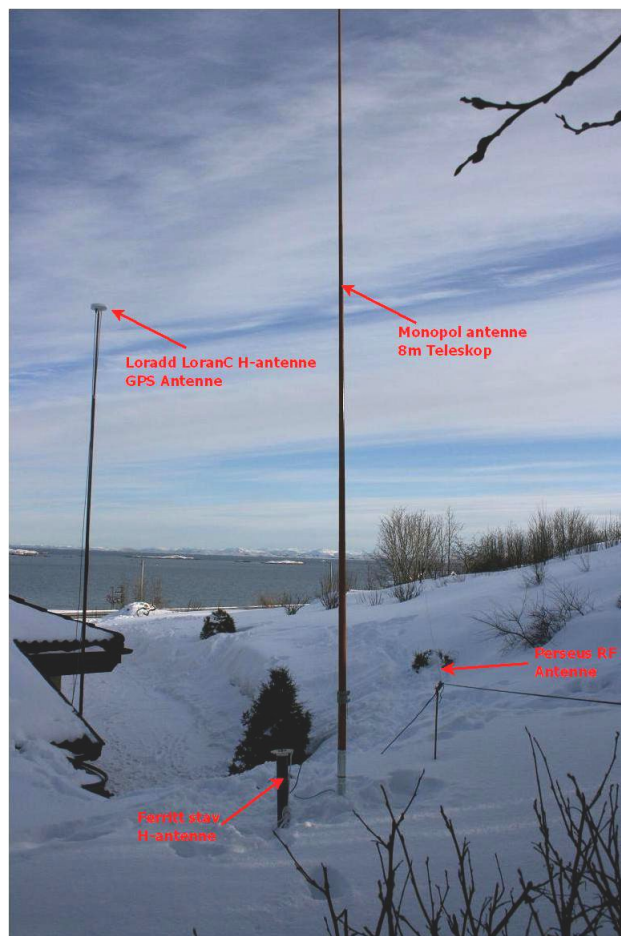


Figur 8-10: Perseus software display i waterfall modus

Tabell 8.1: Eksempel på Perseus SDR .txt logfil

# PERSEUS RECEIVER - MARKERS LOG FILE									
#	# Creation date	18-03-2010	12:31	UTC					
	# Log interval	1.0 s							
	# Frequency units	kHz							
	# Amplitude units	dBm							
# Data format : UTC	Frequency	Amplitude	Frequency	Amplitude	Frequency	Amplitude	Frequency	Amplitude	Amplitude
12:31:05.001	100.000	-98.37	98.962	-102.86	98.047	-104.44	85.962	-120.63	
12:31:06.002	100.000	-96.92	98.962	-104.20	98.047	-109.98	85.962	-123.08	
12:31:07.004	100.000	-96.64	98.962	-101.73	98.047	-100.79	85.962	-118.47	
12:31:08.005	100.000	-96.34	98.962	-102.34	98.047	-105.32	85.962	-122.71	
12:31:09.007	100.000	-96.51	98.962	-102.63	98.047	-107.87	85.962	-113.72	
12:31:10.008	100.000	-93.87	98.962	-98.89	98.047	-99.45	85.962	-121.15	
12:31:11.010	100.000	-96.25	98.962	-104.14	98.047	-109.67	85.962	-125.08	
12:31:12.011	100.000	-94.55	98.962	-103.15	98.047	-104.34	85.962	-122.94	
12:31:13.013	100.000	-95.81	98.962	-104.54	98.047	-108.55	85.962	-121.55	
12:31:14.014	100.000	-93.56	98.962	-96.97	98.047	-99.14	85.962	-118.65	
12:31:15.015	100.000	-96.36	98.962	-102.70	98.047	-106.72	85.962	-122.46	
12:31:16.017	100.000	-96.97	98.962	-104.09	98.047	-109.19	85.962	-121.79	
12:31:17.018	100.000	-97.95	98.962	-100.27	98.047	-100.12	85.962	-121.87	
12:31:18.020	100.000	-98.09	98.962	-103.02	98.047	-104.77	85.962	-123.66	
12:31:19.021	100.000	-97.86	98.962	-104.69	98.047	-109.01	85.962	-122.40	
12:31:20.023	100.000	-98.25	98.962	-101.83	98.047	-105.80	85.962	-122.21	
12:31:21.024	100.000	-97.51	98.962	-99.40	98.047	-101.88	85.962	-122.55	
12:31:22.025	100.000	-96.75	98.962	-104.32	98.047	-106.99	85.962	-121.48	
12:31:23.027	100.000	-96.66	98.962	-101.17	98.047	-105.00	85.962	-120.49	
12:31:24.028	100.000	-95.14	98.962	-104.46	98.047	-106.61	85.962	-123.73	

## 8.5 Jammeantenner; Teleskopantenne og stavantenne.



Figur 8-11: Antenner brukt under målingene

### Antennetyper brukt under målinger

**Innledning** De to mest brukte antennene for langbølge(LF) er den vertikale monopolen<sup>7</sup> og en loop-antenne. Monopol antennen kan betraktes som en elektrisk antenne, dette på grunn av at den produserer et elektrisk felt nært antennen mens det magnetiske feltet oppstår lengre ut fra antennen. Mens derimot Loop-antennen er en magnetisk antenne som genererer et magnetisk felt nært antennen mens det elektriske feltet oppstår lengre ut fra antennen. Som et resultat av dette vil kildene for tap til monopol antennen ligge i området rundt antennen mens for loop antennen er det de indre tapene som er gjeldende. Men for begge antennene er det om å få forholdet mellom strålingsmotstand og tapsmotstand til å bli størst mulig. På grunn av at den ene antennen er en magnetisk antenne og den andre er en monopol(elektrisk) vil det transmitterte feltet (H og E) ut fra disse antennene være i 90 grader i forhold til hverandre.

<sup>7</sup>Oftest benevnet med Marconi antenne

**Antenner benyttet i måleoppsettet** Under jammemålingene ble det benyttet en vertikal wire antenne (monopol) og en ferritt stavantenne som kan betraktes som en magnetisk antenne. For mottak av LoranC signaler ble den kombinerte LoranC/GPS antenne fra Reelektronika brukt. Overvåking av LoranC signaler og atmosfærisk støy, Perseus, ble utført ved hjelp av en 20m lang A377N dipol (wire) antenne.

**Teleskopisk monopol antenne** Den teleskopiske monopolantennen brukt til målingene er en wireantenne med lengde 8 meter (se figur:8-11 og 8-12).



**Figur 8-12:** Teleskop monopolantenne

**Antennetilkopling, kabling** Ferritt, monopol og dipol ble koplet til egnet utstyr via en RG58 coaxial kabel med karakteristisk impedans lik  $50\Omega$ . Til GPS og LoranC antenne ble det brukt original kabler levert av Reelektronika.

### 8.5.1 Ferritt stavantenne, produsert av FFI Horten.

**Ferritt stavantenne** I tillegg til monopolantennen ble det benyttet en ferritt-stavantenne. Dette er en type antenne som er bygd opp ved at en forholdsvis tynn ledning/tråd tvinnes som en solenoid rundt en stav av ferritt. Vanligvis er det et isolerende material mellom staven og solenoiden, selve ledningen/tråden kan også være isolert. Denne konstruksjonen kan betraktes som en serie med små tråd løkker (eng. loops) der deres magnetfelt blir multiplisert av ferritt kjernen. Fjernfeltet defineres lik fjernfeltet som ved en loop antenne og direktiviteten er  $3/2$  (Balanis 2005).

På grunn av LoranC mottakeren i forsøket bruker en H-antenne for mottak av LoranC signal ble denne antennen benyttet for å se om den vil ha andre egenskaper enn en monopol. Ettersom denne antennen ikke er så følsom for de direkte omgivelsene rundt antennen er den egnet til forsøk lik de som er utført i denne rapporten.



**Figur 8-13:** Ferritt stavantenne

Ferritt antennen benyttet i denne rapporten (se figur:8-13) har følgende egenskaper:

- En solenoid viklet på en ferrittstav som har diameter  $d=2,54$  cm og lengde  $l=0,3048$  meter.
- Ferritt materialet har en initial relativ permeabilitet på 3000, men den effektive relative verdien er mye lavere.
- Spolen har diameter  $d=3,175$  cm og lengden på spolen er ca 0.3 meter.
- Koeffisienten for selvinduksjon er målt til ca  $1,2 [mH]$ .
- Dersom spolen mates med spenningen  $U$  (direkte over spolen) vil strømmen bli (modulen)  $I = U/(R + j\omega L)$ .

- Spolen har  $N = 210$  tårn med AWG 17, men tapet i spolen ( $R$ ) er større enn dette slik at  $Q$ -faktoren gjerne er av størrelsesorden 100 (målinger ved  $f = 10$  kHz gir  $Q = 70$ ).
- Den magnetiske induksjonen  $B$  (nT) i avstand  $X$  fra staven ( $X \gg l$ ) i stavens lengderetning er nå gitt ved  $B = \mu_0 m / (4\pi X^3)$ , der  $m = \mu N A I$ ,  $A$  er arealet av solenoiden.
- Den magnetiske induksjonen på tvers av spolens akse er halvparten av verdien  $B$  gitt ovenfor.

På grunn av at en antenne av denne typen vil ha et tap i fjernfeltet på  $\frac{1}{r^3}$  i motsetning til den vertikale monopolen  $\frac{1}{r^2}$ , der  $r$  er avstand fra antennen, vil denne antennen være lite egnet til jamming over lengre distanser.

## 8.6 Datamaskiner

Link til Fujitsu Siemens S series Laptop: → Fujitsu.



**Figur 8-14:** Login DR786EX-M Tablet Pc

## Appendix A - Grunnlag for signalberegninger

Tabell 8.2: Beregning av LoranC signalnivå; Berlevåg og Bø - Frøya

<b>Berlevåg - Frøya</b>					11.mar
Fra	Til	Type underlag	Lengde [km]	Dempning [dB]	Avstand [km]
Berlevåg	Vidda	Tørrt land	400	-24	1170
Vidda	Brønnøysund	Fjell	480	-21	
Brønnøysund	Frøya	Sjø	290	-5	
Teoretisk demp. -20dB/dek=					-61,36
<b>Total dempning</b>					<b>-111,36</b>
<b>Utsendt signalstyrke</b>					<b>133,52</b>
<b>Signalstyrke ved Frøya</b>					<b>22,16</b>
<b>Bø - Frøya</b>					11.mar
Fra	Til	Type underlag	Lengde [km]	Dempning [dB]	Avstand [km]
Bø	Frøya	Sjø	600	-5	600
Teoretisk demp. -20dB/dek=					-55,56
Diffraksjon					-11,00
<b>Total dempning</b>					<b>-71,56</b>
<b>Utsendt signalstyrke</b>					<b>135,56</b>
<b>Signalstyrke ved Frøya</b>					<b>64,00</b>



Tabell 8.3: Beregning av LoranC signalnivå; Værlandet og Jan Mayen - Frøya

<b>Værlandet - Frøya</b>						11.mar
Fra	Til	Type underlag	Lengde [km]	Dempning [dB]	Avstand [km]	
Værlandet	Florø	Sjø	35	-1	340	
Florø	Kr.Sund	Fjell	220	-18		
Kr.Sund	Smøla	Sjø	25	-2		
Smøla	Frøya	Tørt land	60	-5		
Teoretisk demp. -20dB/dek=						-50,88
<b>Total dempning</b>						<b>-76,88</b>
<b>Utsendt signalstyrke</b>						<b>133,52</b>
<b>Signalstyrke ved Frøya</b>						<b>56,64</b>
<b>Jan Mayen - Frøya</b>						11.mar
Fra	Til	Type underlag	Lengde [km]	Dempning [dB]	Avstand [km]	
Jan Mayen	Frøya	Sjø	1090	-13	1090	
GRNWAVE						
Teoretisk demp. -20dB/dek=						-27,5
Diffraksjon						-60,75
<b>Total dempning</b>						<b>-101,25</b>
<b>Utsendt signalstyrke</b>						<b>133,52</b>
<b>Signalstyrke ved Frøya</b>						<b>32,27</b>

Tabell 8.4: Beregning av Loranc signalnivå; Edje og Sylt - Frøya

Ejde - Frøya					11.mar
Fra	Til	Type underlag	Lengde [km]	Dempning [dB]	Avstand [km]
Ejde	Frøya	Sjø	820	-9	820
GRNWAVE					
		Diffraksjon		-18,20	
		Teoretisk demp. -20dB/dek=		-58,28	
			<b>Total dempning</b>	<b>-85,48</b>	
			<b>Utsendt signalstyrke</b>	<b>135,56</b>	
			<b>Signalstyrke ved Frøya</b>	<b>50,09</b>	
Sylt - Frøya					11.mar
Fra	Til	Type underlag	Lengde [km]	Dempning [dB]	Avstand [km]
Sylt	Kiltmøller	Tørr land	250	-17	1010
Kiltmøller	Grimstad	Sjø	140	-1	
Grimstad	Hovden	Tørr land	80	-4	
Hovden	Snillfjord	Fjell	500	-19	
Snillfjord	Frøya	Tørr land	40	-2	
Teoretisk demp. -20dB/dek=					
				-59,87	
			<b>Total dempning</b>	<b>-102,87</b>	
			<b>Utsendt signalstyrke</b>	<b>133,52</b>	
			<b>Signalstyrke ved Frøya</b>	<b>30,65</b>	

TOAA Logs										
Timestamp:		59334,00		Version:		1.0		Noise Loop 1:		36,52
Update Interval:		5,00		Clock status:		TOALOCK		Noise Loop 2:		38,07
Integration Time:		5,00		Clock error:		1,2200E-09		Num Stations:		10
Station	SS	SNR	B-Q	ECD	CI-Q	State	TOA (us)	Doppler	LockTime	
7001M	51,55	13,91	0,956	1,005	0,371	0x0000	42667,4628	-6,92E-010	59325,00	
7001X	38,79	-1,72	0,668	0,408	0,268	0x0000	58407,8101	4,85E-009	59325,00	
7001Y	21,80	-17,68	0,021	-1,396	0,062	0x0001	3676,0257	8,87E-009	5238,01	
7499M	14,68	-24,46	0,003	-4,707	0,000	0x0001	18813,0723	-8,40E-009	4890,02	
7499X	0,00	0,00	0,019	-4,518	0,000	0x00D1	-1,0000	0,00E+000	2618,95	
7499Y	46,10	6,51	0,862	-1,286	0,145	0x0000	46144,8337	-1,10E-009	59318,96	
9007M	48,53	8,49	0,903	1,390	0,153	0x0000	1249,6657	-7,66E-010	59331,99	
9007W	38,71	-1,80	0,795	0,306	0,294	0x0000	16367,7900	2,16E-009	59332,08	
9007X	51,62	13,98	0,916	1,042	0,359	0x0000	28527,4871	4,94E-010	59331,99	
9007Y	45,89	6,30	0,858	-1,334	0,128	0x0000	40764,8123	-6,40E-010	59331,99	

Figur 8-15: Observerte LoranC signaler, 25.februar, REF1

TOAA Logs										
Timestamp:		71844,00		Version:		1.0		Noise Loop 1:		38,63
Update Interval:		5,00		Clock status:		TOALOCK		Noise Loop 2:		36,71
Integration Time:		5,00		Clock error:		1,1200E-09		Num Stations:		10
Station	SS	SNR	B-Q	ECD	CI-Q	State	TOA (us)	Doppler	LockTime	
7001M	51,54	12,89	0,960	1,020	0,357	0x0000	42667,3897	-9,38E-010	71835,02	
7001X	38,59	-1,60	0,688	-0,151	0,379	0x0000	58407,7702	6,99E-010	71835,02	
7001Y	26,27	-13,55	0,168	2,516	0,000	0x0001	3686,1683	-1,41E-008	1607,99	
7499M	15,65	-22,78	0,087	1,887	0,000	0x0001	18803,4819	-3,64E-008	1611,01	
7499X	5,89	-33,10	0,033	-4,112	0,000	0x0081	35294,3763	0,00E+000	1611,01	
7499Y	46,04	6,15	0,900	-1,150	0,167	0x0000	46144,7612	-7,70E-010	71829,02	
9007M	48,51	9,62	0,918	1,423	0,138	0x0000	1249,6129	-6,49E-010	71841,99	
9007W	38,29	-1,89	0,648	0,253	0,294	0x0000	16367,7489	2,11E-009	71842,09	
9007X	51,63	12,98	0,918	1,018	0,359	0x0000	28527,3927	-1,49E-009	71841,99	
9007Y	45,76	5,88	0,843	-1,064	0,195	0x0000	40764,7512	1,22E-009	71841,99	

Figur 8-16: Observerte LoranC signaler, 25.februar, REF2



# Figurer

3-1	GPS jammere tilgjengelige på internett . . . . .	10
3-2	Royal Majesty grunstøtter ved Nantucket, property of <a href="http://www.rvs.uni-bielefeld.de">http://www.rvs.uni-bielefeld.de</a> . . . . .	13
4-1	Transmisjons sekvens for LoranC kjede med 3 slavestasjoner . . . . .	15
4-2	Hyperbolsk nett bestående av LOP fra senderparene M-X og M-Y . . . . .	17
4-3	Generell oppbygning av en LoranC mottaker . . . . .	19
4-4	LoranC pulsform og følgepunkt . . . . .	20
4-5	Signalspektrum for LoranC, Ejde (GRI 9007), spektrallinjer fordelt med 5.55 Hz. . . . .	22
4-6	Kamfilter gitt av følgesløyfen(sampling) i en mottaker med synkron-, asynkron- og nær-synkron interferens. . . . .	23
4-7	Eksempel på graf gitt av ITU-R P.368-9 . . . . .	26
4-8	Antenne nært bakkenivå, Sommerfeld's ligning . . . . .	28
4-9	Flytdiagram Millingtons metode, utarbeidet ifm denne rapporten. . . . .	31
4-10	Millington, forenklet grafisk metode, økende elektrisk ledningsevne. . . . .	32
4-11	Millington, forenklet grafisk metode, avtagende elektrisk ledningsevne. . . . .	33
4-12	Expected value of atm.noise $F_{atm}$ (dB above $kT_b$ at 1MHz). . . . .	36
4-13	Variation of radionoise with frequency . . . . .	37
4-14	Data on noise variability and character . . . . .	38
4-15	Jammeantenne . . . . .	45
4-16	Strålingsmotstand som funksjon av antennens lengde . . . . .	47
4-17	Ekvivalent skjema for valgt antenne . . . . .	50
5-1	Kart som viser Frøya og LoranC sendere . . . . .	51
5-2	Kart som viser Frøyas beliggenhet . . . . .	52
5-3	Beregning av LoranC signal fra Lorsta Bø . . . . .	54
5-4	Beregning av LoranC signal fra Lorsta Sylt . . . . .	54
6-1	Oppsett for jammemålinger på Frøya . . . . .	63
6-2	Countinuous wave, ren tone . . . . .	64
6-3	Frekvenssveipet bærebølge . . . . .	64
6-4	Amplitudemodulert signal . . . . .	65
6-5	Frekvensmodulert signal nr 1 . . . . .	65
6-6	Frekvensmodulert signal nr 2 . . . . .	66
6-7	Eksempler på scatterplott, jam12 og jam13 . . . . .	75
6-8	FFT, Magnetisk vs. Teleskopantenne, jam9 og jam10 . . . . .	76
6-9	Posisjonsplott før og etter UB jamming . . . . .	79

6-10	Loradd FFT under UB-jamming . . . . .	79
6-11	Posisjonsplott før og etter FSB-jamming, jam16 . . . . .	81
6-12	Loradd FFT under FSB-jamming, jam16 . . . . .	81
6-13	Posisjonsplott før og etter AM jamming, jam9 . . . . .	82
6-14	Loradd FFT under AM jamming, jam9 . . . . .	83
6-15	Posisjonsplott før og etter FM jamming, jam4 . . . . .	83
6-16	Loradd FFT under FM jamming, jam4 . . . . .	84
8-1	LoranC mottaker og SDR, front . . . . .	94
8-2	Blokkdiagram LORADD LoranC mottaker, kilde: Reelektronika . . . . .	95
8-3	Tilkoplinger LoranC mottaker, bakside . . . . .	96
8-4	Grafisk presentasjon, LERXanalyser . . . . .	97
8-5	Posisjonsplott, LERXanalyser . . . . .	97
8-6	Signalspektrum 70-130KHz, LERXanalyser . . . . .	98
8-7	H-field antenne with GPS patch included . . . . .	99
8-8	Tilkoplinger SDR, bakside . . . . .	99
8-9	Perseus software display i spectrum modus . . . . .	100
8-10	Perseus software display i waterfall modus . . . . .	101
8-11	Antenner brukt under målingene . . . . .	103
8-12	Teleskop monopolantenne . . . . .	104
8-13	Feritt stavantenne . . . . .	105
8-14	Login DR786EX-M Tablet Pc . . . . .	106
8-15	Observerte LoranC signaler, 25.februar, REF1 . . . . .	111
8-16	Observerte LoranC signaler, 25.februar, REF2 . . . . .	111

# Tabeller

4.1	Sammenligning av senderantenner . . . . .	50
5.1	Utstrålt effekt fra aktuelle Lorsta . . . . .	53
5.2	Avstand fra Lorsta til Frøya . . . . .	53
5.3	Beregnet signalverdier fra aktuelle LORSTA . . . . .	55
5.4	SNR Frøya [dB] . . . . .	56
5.5	LORSTA data, Frøya . . . . .	57
5.6	Jamming av LORSTA Bø, 3 typer topografi . . . . .	59
5.7	Jamming av LORSTA Jan Mayen, 3 typer topografi . . . . .	60
5.8	Jamming av LORSTA Ejde, 3 typer topografi . . . . .	61
6.1	Støyberegning ett kalenderår, Frøya . . . . .	68
6.2	Teoretiske beregninger vs. målt atmosfærisk støy . . . . .	69
6.3	Sammenligning av beregnet og observert LoranC SNR . . . . .	70
6.4	Jammeobservasjoner del 1 av 3 . . . . .	72
6.5	Jammeobservasjoner del 2 av 3 . . . . .	73
6.6	Jammeobservasjoner del 3 av 3 . . . . .	74
6.7	Første jamming der feilplottet overgår 90m. . . . .	77
8.1	Eksempel på Perseus SDR .txt logfil . . . . .	102
8.2	Beregning av LoranC signalnivå; Berlevåg og Bø - Frøya . . . . .	108
8.3	Beregning av LoranC signalnivå; Værlandet og Jan Mayen - Frøya . . . . .	109
8.4	Beregning av LoranC signalnivå; Edje og Sylt - Frøya . . . . .	110

# References

- Association, I. L. (2007), 'loran definition document'. [www.loran.org/](http://www.loran.org/).
- Balanis, C. (2005), *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd edn, Wiley-Interscience.
- DOT, V. U. (2001), 'Vulnerability assesment of the transportation infrastructure relying on the global position system'. <http://www.volpe.dot.gov/>.
- E.C.Jordan & Balmain (1968), *Electromagnetic waves and radiating Systems*, 2 edition edn, Prentice Hall.
- Eckersley, T. (1930), 'The calculation of the service area of broadcast stations', *I.R.E Vol 18* . p. 160-193.
- for Marine Service, R. (1977), 'Minimum performance standard loranc receiving equipment'. Report of Special Committee No 70.
- Forssell, B. (2003), *Radionavigationsystems*, 1st edn, TAPIR.
- G.Millington (1949), 'Groundwave propagation over an inhomogeneous smooth earth', *Proceedings of the IRE* . 53-64.
- Grant, Williams, W. & Basker (2009), 'Gps jamming and the impact on mar.nav', *The journal of Navigation* .
- Guard, U. C. (summer 2001), 'Loranc antennas', *Radionavigation Bulletin* . Issue 38.
- IAT (2009), 'Iat report'. [www.loran.org/ILAArchive/IAT-Report-Jan09.pdf](http://www.loran.org/ILAArchive/IAT-Report-Jan09.pdf).
- ITU (2003), 'Itu-r p.453-9, the radio refractive index: its formula and refractivity data'. Geneva, 2003.
- ITU (2007), 'Itu-r p.368-9, groundwave propogation curves for feq. between 10khz and 30mhz'. Geneva, 2007.
- ITU (2009), 'Itu-r p.372-10, radio noise'. Geneva, 2009.
- LaPort, E. (1952), *Radio Antenna Engineering*, first edn, McGraw-Hill.
- Norton, K. A. (1936), 'The propagation of radio waves over the surface of the earth', *Proceedings of the IRE* . 1367-1387.
- Ohren, A. (2009), 'Loranc det robuste navigasjonssystemet?'. Skrevet som forprosjekt ved



NTNU, IME.

Pelgrum, W. J. (2006), *New potential of LF Radionavigation, J.Pelgrum 2006*, W.J Pelgrum.

Sommerfeld, A. N. (1926), 'Propagation of waves in wireless telegraphy', *Ann. Phys.* . p 1135-1153.

US DOT, U. (1992), *LoranC User Handbook*, publ.p16562.5 edn, USCG.

USGovt (2005), 'The us federal radionavigation plan, <http://www.navcen.uscg.gov/pubs>'. .

Volkis, D. J. (2007), *Antenna Engineering handbook*, fourth edition edn, Mc Graw-Hill.

Wait, J. R. (1956), 'Mixed path ground wave propagation:', *Journal of Research of the National Bureau of Standards* . Research Paper 2687.

Welle, D. & of the Basque Country, U. (2004), 'Analysis of the millington prediction method for land-sea-land mixed paths in the medium wave band', *University of the Basque Country UPV-EHU*. .