



Robust och störtålig kommunikation för obemannade farkoster

Utmaningar och möjligheter

GUNNAR ERIKSSON, ANDERS HANSSON, PETER D. HOLM,
JAN NILSSON, JOUNI RANTAKOKKO

Gunnar Eriksson, Anders Hansson, Peter D. Holm,
Jan Nilsson, Jouni Rantakokko

Robust och störtålig kommunikation för obemannade farkoster

Utmaningar och möjligheter

FOI-R--4895--SE

Titel	Robust och störtålig kommunikation för obemannade farkoster – Utmaningar och möjligheter
Title	Robust Communication for Unmanned vehicles – Challenges and Possibilities
Rapportnr / Report No.	FOI-R--4895--SE
Månad / Month	December / December
Utgivningsår / Year	2019
Antal sidor / Pages	47
ISSN	1650-1942
Kund / Customer	FM
Forskningsområde	Ledningsteknologi
FoT område	Samverkansprogrammet
Projektnr / Project No.	E72776
Godkänd av / Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Ledningssystem

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

Dagens obemannade system kräver kontinuerlig kommunikation för sin styrning. Deras förmåga kan reduceras kraftigt eller helt slås ut om plattformarnas kommunikationssystem störs ut. Obemannade system förväntas bli mer autonoma i framtiden. En högre grad av autonomitet förväntas minska datataktsbehoven för styrning av farkosten. Dock kommer behovet av kommunikation att kvarstå med fortsatt höga krav på tillgänglighet.

Rapporten behandlar obemannade markfarkoster och sjöfarkoster. Möjliga kommunikationssystem studeras utifrån deras datatakt och räckvidd. Kommunikation med olika antennhöjder samt med datatakterna 100 kbit/s, 1 Mbit/s och 10 Mbit/s har beaktats för frekvensbanden 50 MHz, 300 MHz och 1500 MHz. Räckviddsskillnaderna mellan kommunikationssystemet med högst datatakt och det med lägst datatakt är ofta betydande. Obemannade farkoster med en högre grad av automation, och därigenom lägre datataktsbehov, kan därför operera över större ytor än farkoster med mindre automation.

Studien visar på behovet av att hitta kommunikationslösningar med förbättrade räckvidder och vi diskuterar i rapporten ett antal relätekniker som potentiellt kan ge förbättrade räckvidder.

Nyckelord: obemannade farkoster, utbredning, terräng, datatakt, räckvidd, kommunikationsbehov

Abstract

Today's unmanned vehicles require continuous communication for their control. If the communication systems are disrupted, the vehicles' ability to perform their tasks may be greatly reduced, or completely eliminated. In the future, unmanned vehicles are expected to become more autonomous. A higher degree of automation is expected to reduce the data rate requirements for controlling the vehicle. The need for robust and reliable communication, however, will remain high.

In the report, we study the communication challenges associated with unmanned ground vehicles and sea vessels. We investigate achievable communication ranges at different data rates, antenna heights, and frequency bands. Communication with the data rates 100 kbit/s, 1 Mbit/s, and 10 Mbit/s are taken into account for the frequency bands 50 MHz, 300 MHz and 1500 MHz. The difference in range between the communication systems with the highest and the lowest data rate can be significant. Hence, a vehicle with a higher degree of automation (lower data rate required) may have a larger operational area compared with one with less automation.

The study shows the need to find communication solutions with improved range and a number of possible relay techniques that may improve the range are discussed in the report.

Keywords: unmanned vehicles, propagation, terrain, data rate, range, communication needs

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Teori	9
2.1	Kommunikationssystemets delar	9
2.2	Datatakt	10
2.3	Adaptivitet	11
2.4	Radiokanalen	11
2.5	Aktiv störning	12
3	Kommunikationsbehov och radiosystemexempel	15
3.1	Kommunikationsbehov	15
3.2	Systemexempel	16
4	Obemannade markfarkoster	17
4.1	Statistiska modeller för länkdämpning	17
4.2	Deterministiska dämpningsberäkningar	20
4.3	Störanalys	26
5	Obemannade sjöfarkoster	31
5.1	Vågutbredning på öppet hav	32
5.2	Vågutbredning i skärgårdsmiljö	34
6	Teknikexempel	39
6.1	Länktekniker	39
6.2	Störsäker kommunikation med hög datatakt	40
6.3	Relänoder	40
7	Slutsatser och rekommendationer	43
A	Regressionsparametrar	45
	Referenser	47

FOI-R--4895--SE

1 Inledning

Det dimensionerande scenariot är ett väpnat angrepp från en kvalificerad motståndare som förväntas ha avsevärda resurser för telekrig, både mot kommunikationssystem och satellitnavigeringssystem. Dagens fjärrstyrda obemannade system förutsätter kontinuerlig kommunikation för sin styrning och deras förmåga att utföra sin uppgift kan reduceras kraftigt eller helt slås ut genom att störa ut plattformarnas kommunikations- och navigeringssystem.

Med *teleopererade system* avser vi system där operatören styr plattformen baserat på realtidsvideo som skickas från plattformens elektrooptiska eller IR-sensorer (EO/IR). Teleopererade system fungerar inte om datatakterna är för låga, eller fördröjningarna för höga, på kommunikationslänken. Systemen kräver en robust kommunikation med hög tillgänglighet. Kommunikationsbehovet mellan två obemannade farkoster, eller till en kontrollstation, varierar beroende på tillämpningen. Obemannade farkoster används operativt i många olika tillämpningar. Farkosterna kan vara alltifrån helt autonoma till helt fjärrstyrda och röra sig på marken, i luften, på vattnet eller under vattnet.

Rapporten behandlar utmaningar och möjligheter för obemannade markfarkoster och sjöfarkoster. Målet är att undersöka vilka kommunikationsavstånd och datatakter som kan realiseras för kommunikation mellan en kontrollstation och en obemannad farkost, samt mellan två obemannade farkoster. Prestanda undersöks för olika antennhöjder samt för frekvensbanden 50 MHz, 300 MHz och 1500 MHz. Länkar med tre olika tänkbara datatakter studeras: en låg datatakt på 100 kbit/s, en medeldatatakt på 1 Mbit/s, och en hög datatakt på 10 Mbit/s. Syftet är att utgående från resultaten påvisa behov av ytterligare studier och ge exempel på frågeställningar där forskning behöver initieras.

Kapitel 2 beskriver grundläggande teori för arbetet. Kommunikationsbehoven och de systemexempel som används i analyserna specificeras i kapitel 3. Kapitel 4 och 5 behandlar obemannade mark- respektive sjöfarkoster. Exempel på tekniker som kan förbättra möjligheterna att uppfylla kommunikationsbehoven ges i kapitel 6 och slutsatser med rekommendationer från studien summeras i kapitel 7.

FOI-R--4895--SE

2 Teori

I detta kapitel ges en beskrivning av kommunikationssystemets grundläggande beståndsdelar. Huvudsyftet är att ge en förståelse för de faktorer som påverkar ett radiosystems datatakt och de avvägningar som med nödvändighet behöver göras mellan datatakt, räckvidd och robusthet.

2.1 Kommunikationssystemets delar

De grundläggande beståndsdelarna i ett radiosystem illustreras i Figur 2.1. Källkodning innebär att kommunikationsinnehållet representeras effektivt och kompakt, ofta som binär (digital) information. Eventuell kryptering kan också ses som en typ av källkodning.

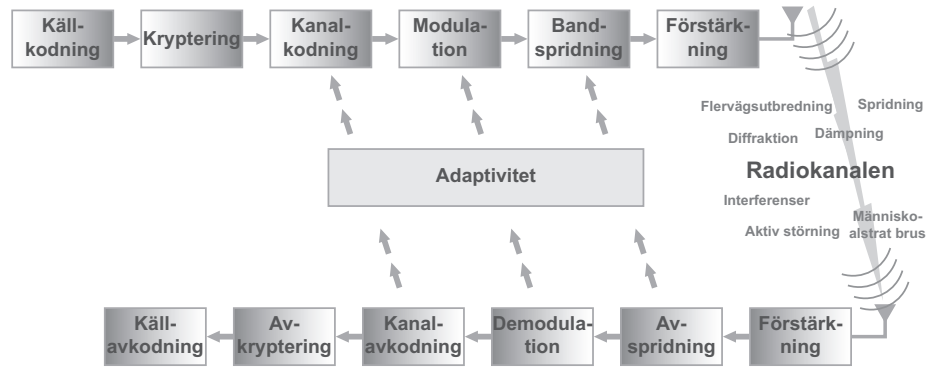
Om den mottagna signalen är för svag eller störd, så kan inte alla bitar återskapas korrekt jämfört med den bitsekvens som har sänts ut. För att kunna rätta och upptäcka sådana bitfel används kanalkodning, eller felrättande kodning. Detta innebär att redundanta bitar läggs till i bitsekvensen på ett systematiskt sätt före modulationen. Denna extra information utnyttjas sedan i radiomottagaren för att upptäcka och rätta felaktiga bitar från demodulatorn. Med felrättande kodning kan bitfels sannolikheten minskas kraftigt i radiomottagaren.

Modulation innebär att de digitala symbolerna påverkar (modulerar) en bärvåg så att informationen kan överföras över radiokanalen. Som skydd mot störning eller för att försvåra upptäckt och öka robustheten kan bandspridning användas, vilket innebär att radiosignalen sprids över en större bandbredd än vad som är nödvändigt för kommunikation.

Sedan förstärks signalen och omvandlas med hjälp av en antenn till en radiovåg. Genom att använda riktantenner kan radiosignalen förstärkas i vissa riktningar i rummet. Avancerade gruppantennsystem kan undertrycka aktiv störning eller maximera datatakten i färdande kanaler genom spatiell multiplexing. Sådana system har funnits ett antal år, främst i civila tillämpningar. Radiovågens frekvens och bandbredd, samt vågutbredningsförhållandena, definierar radiokanalen. Radiokanalen påverkar radiovågen på olika sätt mellan sändar- och mottagarantennen.

För ett digitalt kommunikationssystem ger en ökning av utsänd effekt en minskad bitfelssannolikhet (längre räckvidd). Hur mycket utsänd effekt som behövs för att uppnå en viss acceptabel bitfelssannolikhet beror på vilken modulationsmetod och felrättande kodning som används. Förhållandet mellan den mottagna radiosignalens energi och brusnivån i mottagaren avgör om informationen i den utsända signalen kan återskapas. Bruset genereras internt av elektronikkomponenter i mottagaren, och av externa oavsiktliga störningar (telekonflikter och andra former av människoalstrat bakgrundsbrus) eller avsiktlig störning.

I den mottagande radion behandlas signalen av motsvarande komponenter som i den sändande radion, fast i omvänd ordning.



Figur 2.1: Blockschema med komponenterna i ett radiosystem.

2.2 Datatakt

Radiosystemets kapacitet (datatakt) begränsas av ett antal faktorer såsom den bandbredd som är tillgänglig, hur kraftig kodning som har implementerats (kodtakt), modulationstyp (antal bitar information som överförs per symbol), maximalt utsänd effekt och antennförstärkning (t. ex. parabolantenn).

För en kommunikationslänk där sändaren har uteffekten P , ges energin per informationsbit vid mottagaren av sambandet [1, kap. 2]

$$E_b = \frac{PG_t G_m}{LR}, \quad (2.1)$$

där G_t och G_m är sändarens respektive mottagarens antennvinst, L är länkdämpningen mellan de två radiostationerna, och R är informationsdatatakten. Utan avsiktlig eller oavsiktlig störning så kan mottagarbrusets spektraltäthet, med hjälp av mottagarens systembrusfaktor F , uttryckas som

$$N_0 = kT_0 F, \quad (2.2)$$

där $k \approx 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K är Boltzmanns konstant och $T_0 = 290$ K är referenstemperaturen för brusfaktorn F . För att kommunikation över länken ska vara möjlig så måste signal-till brusförhållandet (SNR) vara större än en tröskelnivå γ :

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{PG_t G_m}{kT_0 F L R} > \gamma. \quad (2.3)$$

Detta samband kallas länkbudget och bestämmer relationen mellan radiosystemets parametrar.

En viktig faktor som påverkar den datatakt som kan uppnås är dock vågutbredningsegenskaperna där frisiktskommunikation (eng. *line-of-sight*) ger en avsevärt lägre länkdämpning. Den bandbredd som är tillgänglig för en specifik användare är ofta begränsad då bandbredden delas mellan olika användare och mellan olika system.

Tillgängligheten kan för vissa system, såsom radiosystem som opererar på höga frekvenser och fri optisk kommunikation, påverkas kraftigt av väderförhållanden som regn, dimma, kraftig blåst osv.

2.3 Adaptivitet

Normalt designas systemet för en mycket hög tillgänglighet, bland annat genom att korta ned kommunikationsavstånden så att tillräckliga marginaler finns för att kunna kommunicera även under ogynnsamma förhållanden och för att kunna hantera utvalda störscenarion. Detta medför att under goda förhållanden, till exempel i scenarion utan störning, så kan det vara möjligt att kraftigt öka datatakten om systemet är adaptivt. Principen för adaptiv modulation illustreras med blocket Adaptivitet i figur 2.1, där modulationstypen kan ändras när det estimerade medelvärdet av SNR i mottagaren blir större eller lägre än förutbestämda SNR-tröskelvärden. Adaptiva tekniker är välbeprövade i främst civila radiosystem och fördelarna med dessa vid taktisk kommunikation beskrivs bland annat i [2].

Adaptivitet förutsätter normalt att sändaren har information om kanalförhållandena, till exempel genom det uppskattade medelvärdet av SNR i mottagaren, vilket den kan estimerar när den tar emot signaler från den radioenheten. Även kodtaket för den felrättande kodningen kan adapteras samtidigt med modulationstypen.

I vissa scenarion kan det vara viktigt att undvika upptäckt av fientliga signalspansningsenheter och då kan istället den mest robusta modulationsformen användas, som kan demoduleras vid lägst SNR i mottagaren, och sändarens effekt hålls till ett minimum (adaptiv sändareffekt) för att minska risken för upptäckt.

2.4 Radiokanalen

Radiosignalen utsätts för ett flertal fysiska fenomen som påverkar radiomottagaren, bland annat reflekteras den mot olika objekt, sprids runt hörn och den utsätts även för en varierande dämpning. Denna varierande dämpning kallas fädning och består av två komponenter: storskalig fädning och småskalig fädning. Storskalig fädning uppstår när signalen dämpas olika mycket beroende på terrängen. Den viktigaste faktorn är om det är fri sikt mellan sändaren och mottagaren eftersom signalen kan dämpas kraftigt om den går igenom skog, byggnader eller andra objekt. Småskalig fädning beror på flervägsutbredning där mottagaren tar emot multipla distorderade, tidsförskjutna kopior av signalen. Detta leder till konstruktiv och destruktiv interferens där signalnivån varierar kraftigt över tiden när sändare eller mottagare rör sig. Fädningen är normalt kraftigast i mobila tillämpningar men fädning kan även uppstå på grund av förändringar i radiokanalen vilket gör att flervägsutbredningskomponenterna som anländer till mottagaren varierar i antal, styrka och/eller fasskift.

Vilken modell som kan användas för att approximera länkdämpningen L beror på radiovågens våglängd λ . Generellt kan sägas att dämpningen ökar proportionellt med avståndet r^n mellan sändare och mottagare, där exponenten n är en konstant med ett värde som beror på terrängtypen i omgivningen mellan radioenheterna. I fri rymd är

dämpningen proportionell mot kvadraten på avståndet ($n = 2$):

$$L = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \quad (2.4)$$

och nära mark i svår terräng kan exponenten n vara större än fyra, detta gäller speciellt kommunikation mellan fordonsburna enheter i kuperad terräng. Generellt så ger en ökad antennhöjd över marken en lägre länkdämpning.

2.5 Aktiv störning

Ett radiosystem kan göras mer eller mindre robust mot aktiv störning. Bandspridningstekniker kan användas som skydd mot avsiktlig störning och innebär att signaleffekten sprids över en betydligt större bandbredd än vad som egentligen behövs för kommunikation. Detta medför dock att den tillgängliga kapaciteten minskar jämfört med oskyddade system. En bandspridningsteknik är direktsekvensspridning, där signalen med hjälp av en spridningskod sprids till en större bandbredd. I taktiska kommunikationssystem används framförallt frekvenshopp för att ge störskydd. Hur bra skyddet blir beror på frekvenshoppstakten och över vilken bandbredd systemet hoppar. Det viktiga är att systemet hoppar över en tillräcklig stor bandbredd för att få en stor spridningsvinst. Spridningsvinsten (eng. *processing gain*) definieras som förhållandet mellan den bandbredd som kommunikationssignalen sprids över och kommunikationssystemets dataakt.

Att helt skydda sig mot aktiv störning är inte möjligt om störaren kan placeras på en för störaren fördelaktig plats och störa med tillräcklig hög effekt över den bandbredd som radiosystemet använder. En störsändare kan använda sig av olika tekniker för att vilseleda eller störa en radiomottagare. Följande tekniker är vanliga för en störsändare: (1) bredbandig störning, (2) smalbandig störning eller delbandsstörning, (3) pulsad störning och (4) följestörning. Den enklaste formen av störning är bredbandsstörning. Det innebär att hela störeffekten läggs jämnt fördelad över den bandbredd som radiosystemet använder. Delbandsstörning eller pulsad störning innebär istället att störningen är koncentrerad till delar av frekvensbandet eller delar av tiden. Anledningen är att det i vissa fall får en större påverkan än vad en bredbandig brusstörning orsakar. Följestörning är inriktad mot frekvenshoppande system. Genom att momentant mäta vilken frekvens som används kan störaren koncentrera sin energi till rätt frekvens i rätt tid. Eftersom störaren kan koncentrera effekten till den bandbredd som momentant används av radiosystemet, så kan enheter längre bort störas jämfört med bredbandig störning eller delbandsstörning. Om följestöraren hinner störa en tillräcklig stor del av varje frekvenshopp kommer all sändning att störas ut och radiosystemet har därför ingen fördel av frekvenshoppsförmågan. Avgörande är därför radiosystemets frekvenshoppslängd i relation till den tid det tar för följestöraren att upptäcka signalen och sända ut störeffekt. Dessutom inverkar den geografiska placeringen med utbredningstiderna mellan sändare, mottagare samt följestörare.

En länkbudget under avsiktlig störning med bredbandigt brus kan göras som följer.

På analogt sätt med 2.3 ges signal-störförhållandet enligt

$$\frac{E_b}{N_0 + N_j}, \quad (2.5)$$

där N_j är störningens spektraltäthet vid mottagaren och N_0 kan försummas om stör-signalens brus är starkt. Under bredbandstörning sprider störaren sin uteffekt P_j likformigt inom bandbredden $W_j \geq W_s$, där W_s är den bandbredd som kommunikations-signalen sprids över. Om störaren har en antennvinst G_{jr} i riktning mot mottagaren kan vi uttrycka störarens spektraltäthet vid mottagaren som

$$N_j = \frac{P_j G_{jr} G_{rj}}{L_{jr} W_j}, \quad (2.6)$$

där L_{jr} är transmissionsförlusten mellan störare och mottagare, och G_{rj} är mottagarens antennvinst i riktning mot störaren.

Om den mottagna störeffekten är lika stor som brusnivån i mottagaren så kommer störningen påverka de mottagare som ligger på räckviddsgränsen. Med detta antagande kan vi ur ekvationerna (2.3) och (2.6) beräkna en tröskel L_{jr}^* för länkdämpningen:

$$\frac{P_j G_{jr} G_{rj}}{L_{jr}^* W_s} = k T_0 F, \quad (2.7)$$

$$L_{jr}^* = \frac{P_j G_{jr} G_{rj}}{W_s k T_0 F}. \quad (2.8)$$

Störaren antas välja sin bandbredd W_j till frekvenshoppssystemets spridningsbandbredd W_s .

FOI-R--4895--SE

3 Kommunikationsbehov och radiosystemexempel

Robust och säker kommunikation är en kritisk komponent för fjärrstyrda obemannade markfarkoster (UGV:er, eng. *unmanned ground vehicle*). Systemens kommunikationsbehov och de systemexempel som studien baseras på beskrivs här.

3.1 Kommunikationsbehov

Styrn länken måste ha en hög grad av robusthet (hög tillgänglighet även i situationer med avsiktlig störning) och kryptering (för att undvika att utomstående kan ta över styrningen av plattformen). Vidare så behöver sensorinformation samt telemetridata (statusinformation) skickas till en markstation eller direkt till olika plattformar. Sensor-datalänken behöver ha en hög dataakt för att kunna skicka sensorinformationen, samt vara krypterad och störskyddad för att undvika avlyssning och avsiktlig störning. Styrdata behöver skickas till plattformen; t. ex. hur den ska förflytta sig och vart sensorerna ska inriktas. Observera att kommunikationen mellan farkosten och operatören normalt är asymmetrisk, d.v.s. mer data behöver skickas från plattformen till operatören än tvärtom.

Teleopererade UGV:er har idag problem med att operatören har svårt att bilda en bra lägesbild utifrån videoströmmen från UGV:n. Detta kan troligen förbättras med hjälp av nya användargränssnitt, men det är också troligt att nya högupplösande sensorer (eventuellt 360-graders kameror) kommer att behöva införas. Det senare skulle öka kravet på dataakt ytterligare. En teleopererad UGV behöver i dagsläget ett kommunikationssystem med en dataakt på flera Mbit/s. Förutom att operera plattformen behöver också sensordata kunna skickas till operatören. Datataktbehovet från UGV till operatör kan minska med en högre grad av automatiserad styrning, samt förbehandling av sensordata där plattformen automatiskt detekterar, identifierar, klassificerar och lokaliserar mål. En autonom UGV skulle klara sig med ett kommunikationssystem med betydligt lägre dataakt, troligen några tiotals kbit/s. Den stora minskningen är en följd av att realtidsvideo inte behövs för att styra plattformen.

Kommunikationsbehoven för obemannade sjöfarkoster (USV:er, eng. *unmanned surface vehicle*) motsvarar de för en UGV. En teleopererad obemannad sjöfarkost behöver i dagsläget ett kommunikationssystem med en dataakt på flera Mbit/s. En autonom USV skulle kunna klara sig med ett kommunikationssystem med några tiotals kbit/s.

I rapporten undersöks exempel på möjliga kommunikationssystem utifrån deras dataakt och räckvidd. Länkar med tre olika datatakt studeras: 10 Mbit/s, 1 Mbit/s och 100 kbit/s. Med dessa värden avses kommunikationssystemets informationsdataakt, vilket är datatakten in till kanalkodningen, respektive ut från kanalavkodningen, i figur 2.1. Den tillgängliga datatakten för användaren är normalt något lägre eftersom en del kapacitet försvinner i form av administrativ trafik för att stödja kommunikationsprotokoll på högre nivåer.

Tabell 3.1: Parametrar för exempelsystem.

f [MHz]	P [dBm]	G_t [dBi]	G_r [dBi]	γ [dB]	F [dB]	R [Mbit/s]	M [dB]	L'' [dB]
50	40	0	0	7	20	0.1 1	10	127 117
300					10	0.1 1		137 127
1500					5	0.1 1 10		142 132 122

3.2 Systemexempel

Vi kan beräkna möjliga värden på länkdämpningen genom att lösa ut L ur andra ledets olikhet i (2.3)

$$L < \frac{PG_tG_m}{kT_0FR\gamma} = L', \quad (3.1)$$

där L' betecknar den största möjliga länkdämpningen som uppfyller olikheten. För att nedbringa antalet kombinationer som behöver beaktas antar vi att samtliga antenner är rundstrålande, d.v.s. $G_t = G_m = 0$ dBi. Parametrarna för våra systemexempel framgår av tabell 3.1, där L'' är det beräknade värdet på den största vågutbredningsdämpning som respektive system kan klara. I logaritmiskt mått beräknas L'' som

$$L'' = L' + M, \quad (3.2)$$

där L' beräknats från de övriga systemparametrarna med hjälp av (3.1) och M är en fädningsmarginal som antagits inkludera både storskalig och småskalig fädning. Vidare antar vi, för att förenkla jämförelserna mellan systemen, att spektraleffektivitet för samtliga systemexempel är lika med ett. Det innebär att kommunikationssignalens bandbredd (utan bandspridning) är lika med dataakten R . Högre spektraleffektivitet ger högre SNR-trösklar och därmed kortare räckvidder. Dataakten 10 Mbit/s kräver stor frekvensbandbredd eller hög spektraleffektivitet. Stora frekvensbandbredder är i praktiken svåra att realisera på frekvenserna 50 MHz och 300 MHz och en dataakt på 10 Mbit/s beaktas därför inte för de frekvenserna.

4 Obemannade markfarkoster

Obemannade markfarkoster, UGV:er, används idag främst för följande uppgifter:

- EOD-robot (eng. *explosive ordnance disposal*)
- Lokal spaning och informationsinhämtning (ISR, eng. *intelligence, surveillance, reconnaissance*)
- Minröjning, minbrytning och fältarbeten
- Bas- och gränsövervakning

UGV:er utvecklas även för spaning, övervakning, målinmätning, logistik, att bära soldatens utrustning och direkta stridsuppgifter. Ett exempel på UGV med en antennhöljd på ca 1,5 meter ges i figur 4.1.

4.1 Statistiska modeller för länkdämpning

Vi använder en enkel statistisk modell där den elementära transmissionsförlusten L_b mellan sändare och mottagare, som funktion av avståndet d , kan skrivas

$$L_b(d) = A + 10n \log_{10} \frac{d}{d_{\text{ref}}} + L_{1s}, \quad (4.1)$$

där A motsvarar dämpningen för referensavståndet d_{ref} och L_{1s} är en stokastisk variabel som beskriver den avståndsoberoende storskaliga fädningen. L_{1s} antas vara nor-



Figur 4.1: Exempel på en typ av UAV (med modulär bärlast) som kan komma att användas för bärhjälp, främre logistik, CASEVAC och bekämpning. Illustration: FOI.

Tabell 4.1: Räckvidd d baserad på statistisk modellering.

f [MHz]	h_s [m]	h_m [m]	$d(50\%)$ [km] 0.1 1 10 [Mbit/s]	$d(90\%)$ [km] 0.1 1 10 [Mbit/s]
50	1.5	1.5	4.2 2.3 –	2.7 1.5 –
	25		12 6.5 –	8.3 4.5 –
	300		42 23 –	30 16 –
300	1.5		3.0 1.7 –	1.4 0.8 –
	25		11 6.1 –	5.4 2.9 –
	300		41 22 –	22 12 –
1500	1.5		1.6 1.0 0.7	0.5 0.3 0.2
	25		7.7 4.0 2.0	1.9 1.0 0.5
	300		44 19 8.0	14 5.8 2.5

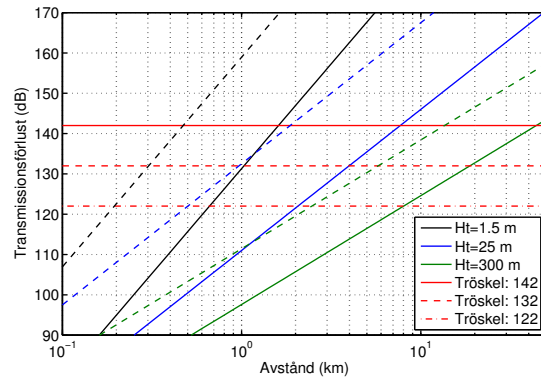
malfördelad med väntevärde noll och standardavvikelse σ . Vi använder genomgående i rapporten ett referensavstånd d_{ref} på en kilometer.

Parametrarna A , n och σ har beräknats för 50, 300 och 1500 MHz genom att slumpmässigt placera ut 2500 par av sändare och mottagare inom ett kvadratisk område med sidan 40 km. Utplaceringen har skett så att logaritmen av avstånden mellan sändare och mottagare är linjärt fördelat på ett givet avståndsintervall. Avståndsintervallet har anpassats så att det motsvarar relevanta kommunikationsavstånd för respektive frekvensområde. Parametrarna A och n har erhållits med hjälp av linjär regression av beräkningsvärdena och σ har skattats från värdenas standardavvikelse från regressionslinjen. Metodiken för att skatta regressionsparametrarna är den samma som beskrivits i [3, 4]¹. Beräkningen har skett för två olika geografiska områden: Östergötland och Jämtland. De erhållna parametrarna finns återgivna i tabell A.1 och A.2 i appendix A.

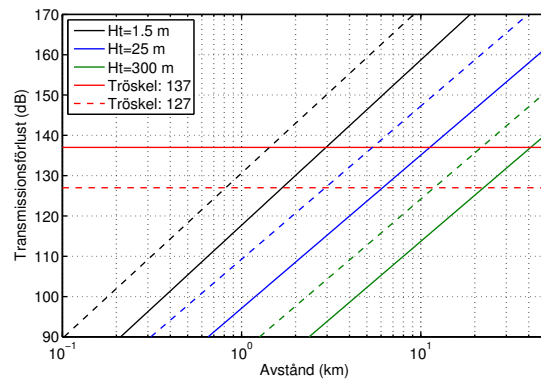
Transmissionsförlust som funktion av avstånd för olika antennhöjder och frekvenser visas i figur 4.2. De heldragna kurvorna, vilka motsvarar dämpningens medianvärde, är beräknade enligt (4.1), med den stokastiska variabeln $L_{ls} = 0$. De övriga parametrarna, som är baserade på beräkningar i Östergötland, har hämtats ur tabell A.1 för *normal* skog i appendix A. De streckade kurvorna motvarar dämpningens 90-percentil². Kurvorna för percentilerna är baserade på att L_{ls} i (4.1) är normalfördelad med standardavvikelsen σ enligt tabell A.1. De horisontella linjerna i figuren anger dämpningströsklarna L'' enligt tabell 3.1 för de olika exempelsystemen. Från skärningspunkterna mellan dämpningskurvorna och trösklarna kan räckvidderna för exempelsystemen bestämmas. De erhållna räckvidderna är sammanfattade i tabell 4.1, där $d(50\%)$ och $d(90\%)$ betecknar räckviddens medianvärde respektive den räckvidd som överskrids i 90 % av fallen. Från räckvidderna i tabellen kan vi konstatera att skillnaden mellan räckviddens medianvärde och 90-percentil ökar med ökande frekvens. Den bakomliggande orsaken är att radiokanalens dämpningsvariation ökar med stigande frekvens till följd av att terränghinghinder, i form av höjder och vegetation, får en allt större inverkan på dämpningen.

¹I [3] beräknades regressionsparametrar för 49 och 300 MHz och i [4] för 1500 MHz. I båda fallen för antennhöjder som avviker något från de som studeras här.

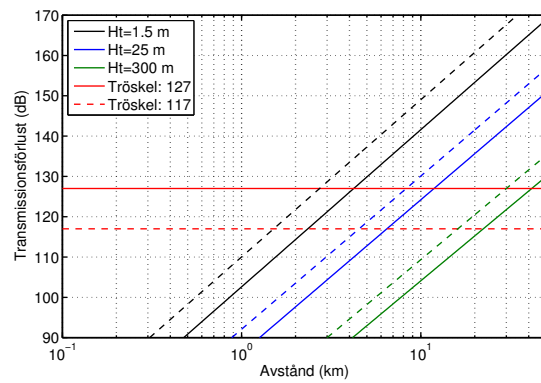
²90-percentilvärdet betyder att dämpningen är lika med, eller mindre än, detta värdet i 90 % av fallen.



(a)

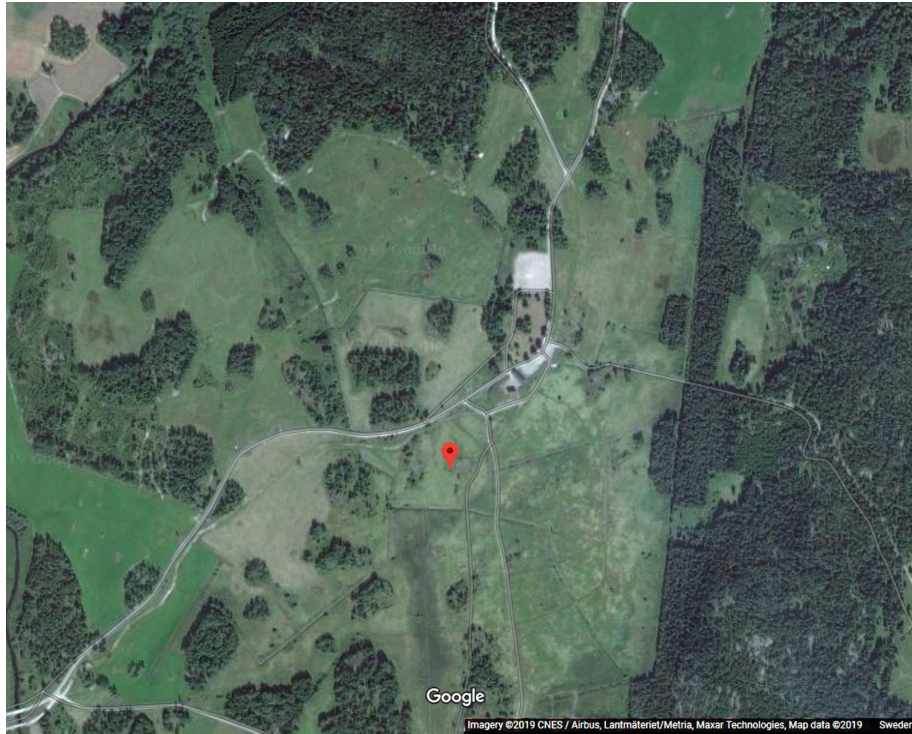


(b)



(c)

Figur 4.2: Transmissionsförlust (medianvärde och 90-percentil) som funktion av avstånd för en mottagare med 1.5 m antennhöjd och en sändare med tre olika antennhöjder. Frekvens: (a) 1500 MHz, (b) 300 MHz och (c) 50 MHz.



Figur 4.3: Området kring sändarplatsen i Kvarn. Foto Google ©2019 CNES/Airbus, Lantmäteriet/Metria, Maxar Technologies.

4.2 Deterministiska dämpningsberäkningar

För att exemplifiera hur terrängens topografi och skogsbeklädnad påverkar utbredningen inom ett specifikt terrängområde, vid olika frekvenser, har även deterministiska vågutbredningsberäkningar genomförts. Beräkningarna har skett inom de militära övningsområdena i Kvarn och Skövde. De tre frekvenser som använts i undersökningen är 1500, 300 och 50 MHz. Dessa är representativa för olika frekvensband som används för taktisk militär kommunikation. Sändarantennhöjderna som undersökts är 1.5, 25 och 300 m. Höjderna är representativa för ett obemannat fordon, en lågtflygande multikopter-UAV alternativt en kontrollstation med upphöjd antenn, respektive en stridsteknisk UAV. Mottagarhöjden är satt till 1.5 m för alla beräkningsfallen.

Beräkningarna är gjorda för kvadratiska områden med mittpunkten i RT90-koordinaterna 6504.5 (norr) och 1474.5 km (öster) för Kvarn och 6471.58 och 1388.36 km för Skövde (plats 1), se figur 4.3 och 4.4. Storleken på beräkningsområdet är 4×4 km, 8×8 km och 16×16 km för 1500, 300 respektive 50 MHz. Att olika frekvenser har fått olika stora beräkningsområden beror på att lägre frekvenser, i allmänhet, ger större täckningsområde. Vidare har en beräkningsmodell baserad på så kallade paraboliska ekvationer (PE) använts i beräkningarna [5–7]. Denna modell har valts för att den kan

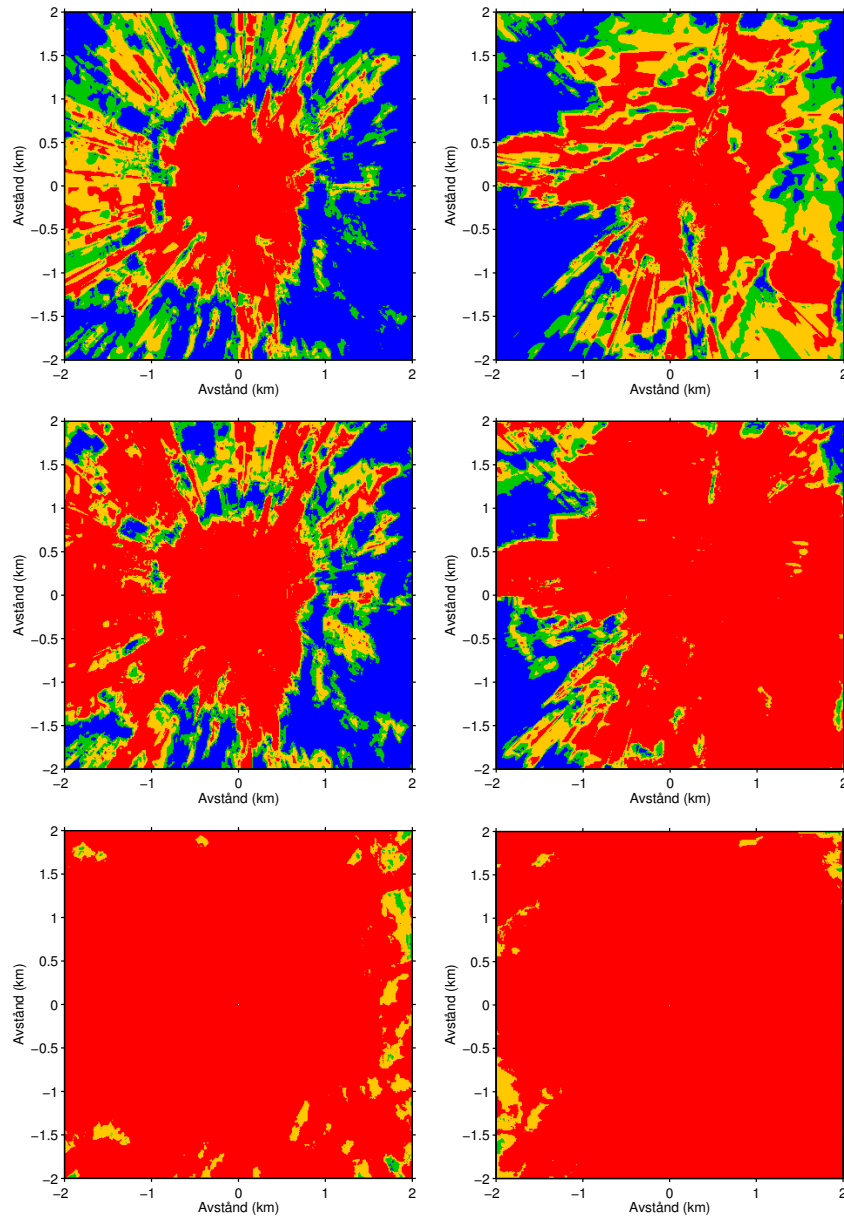


Figur 4.4: Området kring sändarplats 1 i Skövde. Foto Google ©2019 CNES/Airbus, Lantmäteriet/Metria, Maxar Technologies.

ta hänsyn till vegetation på ett bättre sätt än andra modeller som vi har till vårt förfogande. I PE-modellen betraktas skogen som en homogen dielektrisk skiva med förluster. Skogens egenskaper beskrivs därigenom, förutom av höjden, av dess frekvensberoende komplexa dielektricitetskonstant. De elektriska parametrar för skogen som använts i beräkningarna för Kvarn och Skövde motsvarar de som använts för regressionslinjerna i figur 4.2. Metoder för framtagning av elektriska parametrar för skog, baserade på mätningar och specifik dämpning, finns beskrivna i [8, 9].

Topografin beaktas i beräkningarna genom att markhöjden för punkterna mellan sändaren och mottagaren hämtas från en höjddatabas. Eventuell markbeklädning i form av skog fås från en marktäckedatabas. Vegetationshöjden som används vid beräkningarna erhålls genom en enkel översättningstabell mellan marktäcketyper och höjd.

I figur 4.5 visas resultat för Kvarn och Skövde vid 1500 MHz. De beräknade värdena på transmissionsförlusten har i figurerna översatts till möjlig datatakt med hjälp av de tröskelvärden L'' för transmissionsförlusten som angivits i tabell 3.1. Inom de områden som är markerade med röd färg kan en datatakt på 10 Mbit/s upprätthållas. Inom de gulmarkerade områdena kan en datatakt på 1 Mbit/s erhållas och inom de gröna områdena är en datatakt på 0.1 Mbit/s möjlig. Inom de blåmarkerade områdena är ingen av dessa datatakt möjliga. Notera att möjligheten för takten 10 Mbit/s endast undersökts för frekvensen 1500 MHz. Figur 4.5 visar att täckningsområdena för både



Figur 4.5: Beräknade möjliga datatakt vid 1500 MHz för Kvarn (vänster) och Skövde (höger). Sändaren är placerad i centrum av respektive område och har antennhöjden 1.5 m (övre raden), 25 m (mellanraden) och 300 m (nedre raden). Mottagarhöjden är 1.5 m. Datatakt: 10 Mbit/s (röd), 1 Mbit/s (gul), 0.1 Mbit/s (grön), < 0.1 Mbit/s (blå).

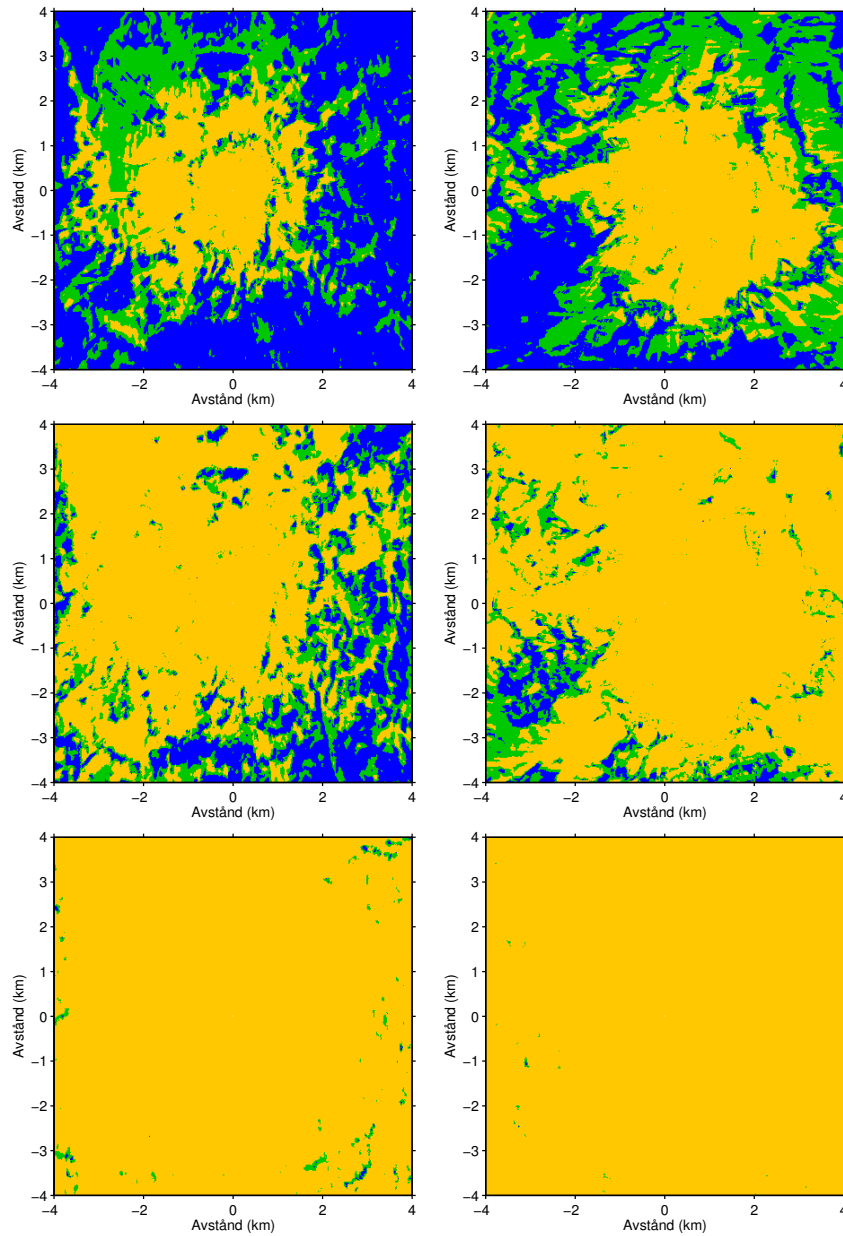
Kvarn och Skövde uppvisar en utpräglad flikighet i sin karaktär. Vi kan notera att övergången mellan en möjlig dataakt på 10 Mbit/s och till en dataakt under 0.1 Mbit/s är mycket abrupt för Kvarn i riktning österut, och för Skövde i sydvästlig riktning. Om vi identifierar dessa övergångar på flygfotona i figur 4.3 och 4.4 ser vi att de sammanfaller med skogspartier på båda platserna.

För den lägsta antennhöjden (1.5 m) är de möjliga kommunikationsavstånden för den högsta dataakten begränsade. I jämförelse med resultaten från de statistiska beräkningarna i tabell 4.1, som för 10 Mbit/s ger en medianräckvidd av 0.7 km och 0.2 km för 90-percentilen, ser beräkningarna för både Kvarn- och Skövdeområdet ut att ge något längre räckvidder. För antennhöjden 25 m ökar räckvidderna och för dataakten 10 Mbit/s ligger räckvidderna i samma storleksordning som från den statistiska modellen. För Kvarn har vi dock fortfarande inte mer än ca 1 km räckvidd för någon av dataakterna i riktning österut. För antennhöjden 300 m fås, i stort sett, täckning med 10 Mbit/s över hela ytan för båda områdena.

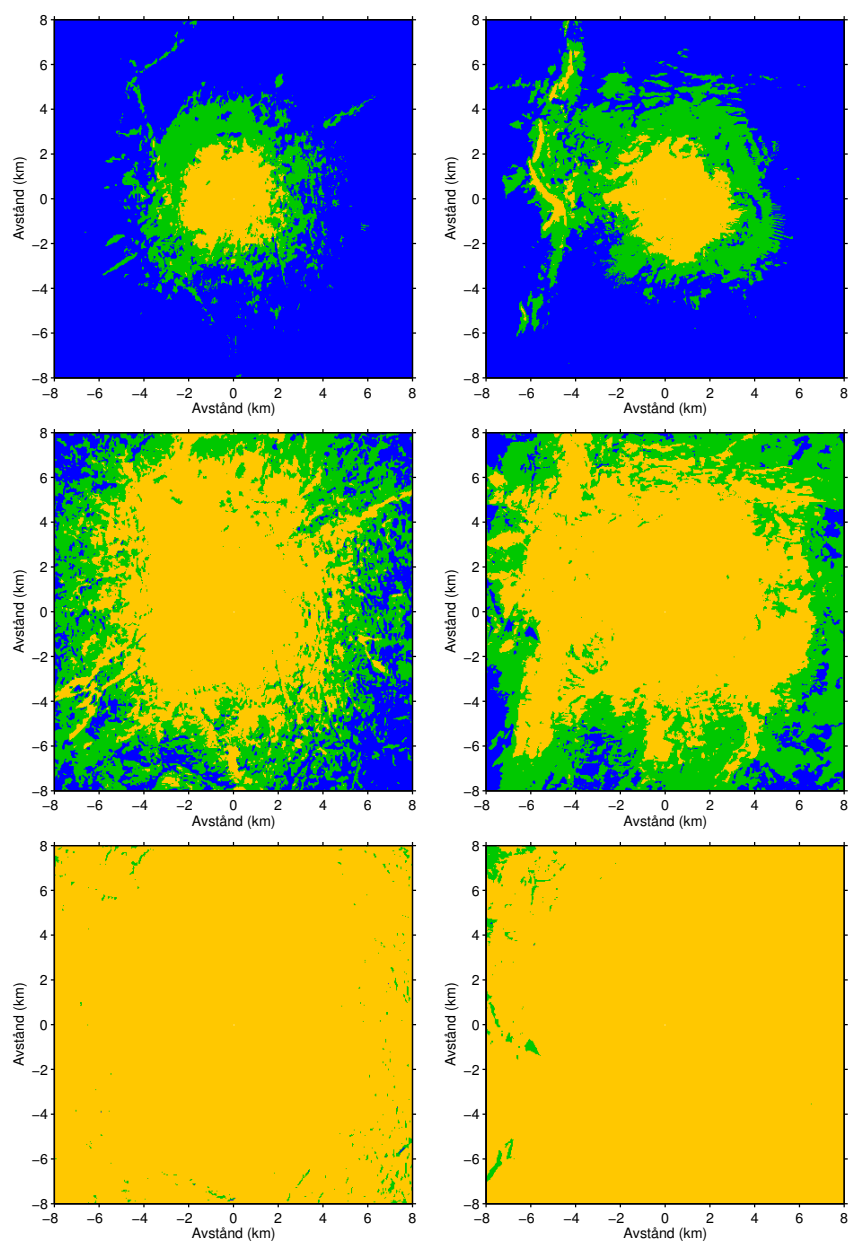
I figur 4.6 och 4.7 visas resultat för frekvensen 300 respektive 50 MHz. För dessa frekvenser har endast dataakter på 0.1 och 1 Mbit/s beräknats. Om vi jämför resultaten för dessa frekvenser med de för 1500 MHz kan vi konstatera att räckvidderna och den täckta ytan ökar för de lägre frekvenserna. Skillnaderna i räckvidd för den högre av dataakterna är inte så stora mellan 300 och 50 MHz, men den lägre dataakten uppvisar en något större räckvidd vid 50 MHz för de båda områdena.

Vågutbredningen vid 1500 MHz påverkas starkt av vegetation, framför allt vid låga antennhöjder. För att illustrera detta har vi genomfört en beräkning för Kvarnområdet med 1.5 m antennhöjder där vegetationen ignoreras. Resultatet framgår av den vänstra bilden i figur 4.8 och kan jämföras med fallet där vegetationen beaktats i bilden till höger (samma bild som figur 4.5(a)).

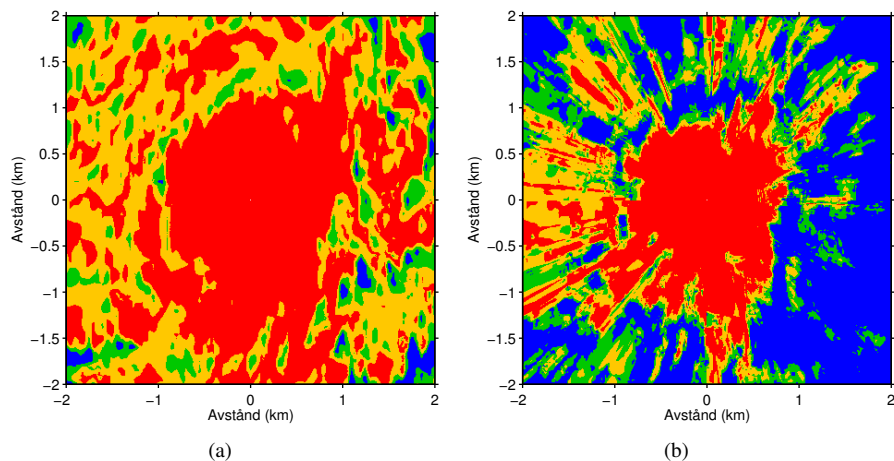
Variationerna över ytan för beräkning utan vegetation är, förutom det rena avståndsberoendet, en effekt av topografin inom området. Skillnaderna mellan figurerna visar att vegetationen för denna frekvens har en mycket avgörande betydelse för vilka räckvidder som kan erhållas för en given dataakt.



Figur 4.6: Beräknade möjliga datatakt vid 300 MHz för Kvarn (vänster) och Skövde (höger). Sändaren är placerad i centrum av respektive område och har antennhöjden 1.5 m (övre raden), 25 m (mellanraden) och 300 m (nedre raden). Mottagarhöjden är 1.5 m. Datatakt: 1 Mbit/s (gul), 0.1 Mbit/s (grön), < 0.1 Mbit/s (blå).



Figur 4.7: Beräknade möjliga datatakt vid 50 MHz för Kvarn (vänster) och Skövde (höger). Sändaren är placerad i centrum av respektive område och har antennhöjden 1.5 m (övre raden), 25 m (mellanraden) och 300 m (nedre raden). Mottagarhöjden är 1.5 m. Datatakt: 1 Mbit/s (gul), 0.1 Mbit/s (grön), < 0.1 Mbit/s (blå).



Figur 4.8: Exempel på skogens inverkan på beräknade datatakt i Kvarnområdet vid 1500 MHz för sändar- och mottagarhöjden 1.5 m. (a): Utan skog; (b) Med skog.

Tabell 4.2: Tröskelvärden L_{jr}^* för dämpningen mellan störare och mottagare.

f [MHz]	W_s [dBHz]	F [dB]	kT_0F [dBWHz ⁻¹]	$P_j G_{jr}$ [dBW]	L_{jr}^* [dB]
50	73	20	-184	0 16	111 127
300		15	-194	0 16	121 137
1500		5	-199	0 16	126 142

4.3 Störanalys

En enkel analys av störkänsligheten för kommunikationen med en obemannad markfarkost för exemplsystemen i kapitel 3 har genomförts. Två olika generiska flygande störare har beaktats. Den första antas ha en effektivt utstrålad effekt (EIRP) på 0 dBW. Störaren antas operera på 100–300 meters höjd över mark. Den andra störaren antas ha en EIRP på 16 dBW och antas flyga på 1000 meters höjd. Båda störarna antas generera ett bredbandigt brus över en bandbredd av 20 MHz.

En störares möjlighet att störa kommunikationen mellan en sändare och mottagare beror, förutom av den mottagna störsignalens effekt, också på vilken signaleffekt den legitime sändaren har i mottagaren. För enkelhets skull används här kriteriet räckviddspåverkan, d.v.s. att störaren kan påverka en mottagare när förbindelsen redan ligger nära räckviddsgränsen. Tröskelvärdet L_{jr}^* på dämpningen mellan störaren och mottagaren (för att störaren ska ge en räckviddspåverkan) beräknas med ekvation (2.8) baserat på störarens och mottagarens systemparametrar. De numeriska värdena på L_{jr}^* framgår av tabell 4.2. Det bör noteras att antagandena om att exemplsystemen arbetar

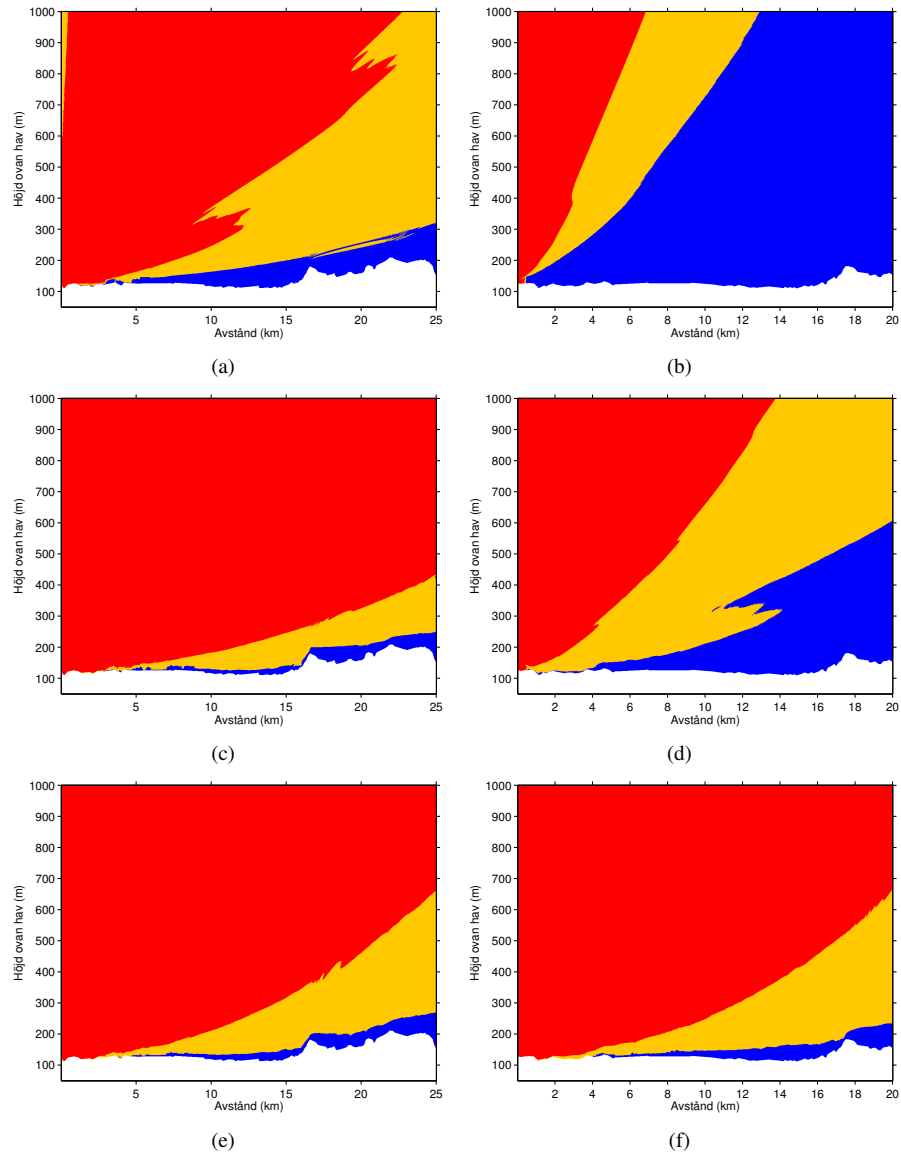


Figur 4.9: Området i Skövde (plats 2) med en sändare placerad nära skog. Foto Google ©2019 CNES/Airbus, Lantmäteriet/Metria, Maxar Technologies.

vid samma spektraleffektivitet och bandsprids över samma bandbredd, oberoende av datatakt, medför att gränsen för räckviddspåverkan blir datataktsoberoende.

Som den tidigare analysen av möjliga kommunikationsavstånd för olika datatakt visade så är terrängen kring en låg radioterminal avgörande för räckvidden på höga frekvenser. För att illustrera hur störkänsligheten påverkas av vegetation i närheten av en lågt placerad mottagare jämför vi två närliggande stationsplatser i Skövdeområdet. Plats 1 är samma plats som användes vid räckviddsanalysen och den är markerad på flygfotot i figur 4.4. Mottagarplatsen är relativt fri från vegetation i närområdet. Den ridå av träd som syns i fotot öster om stationsplatsen ligger i en svacka kring en å som sträcker sig i nord-sydlig riktning. Svackan medför att trädens höjd, relativt mottagaren, reduceras kraftigt. Plats 2 är belägen ca 1.1 km västsydväst från plats 1 och är markerad på flygfotot i figur 4.9. Mottagaren ligger här precis väster om en skogsdunge med höga träd.

Vi studerar för vilka höjder och avstånd en störare, lokaliserad rakt österut från respektive mottagarplats, ger en räckviddspåverkan för dessa stationsplatser. Resultatet av beräkningarna presenteras i figur 4.10 i form av färkodade områden (höjd och avstånd) inom vilka de två olika antagna störarna ger en påverkan på räckvidden. Re-



Figur 4.10: Beräknat område (höjd och avstånd) varifrån störpåverkan kan erhållas för Skövde plats 1 (vänster) och plats 2 (höger). Mottagaren är placerad 1.5 m över marken. Frekvens: 1500 MHz (övre raden), 300 MHz (mellanraden) och 50 MHz (nedre raden). För färgkodningens betydelse, se texten.

sultaten för plats 1 och plats 2 visas i den vänstra, respektive högra, kolumnen för frekvenserna 1500, 300 och 50 MHz radvis uppifrån. Blåmarkerade områden innebär att ingen av de två störarna åstadkommer påverkan. Gulmarkerade områden innebär att enbart störaren med den högre uteffekten åstadkommer påverkan. Rödmarkerade områdena innebär att båda störarna kan åstadkomma påverkan. De angivna höjderna i figurerna är höjd över havet. Båda stationsplatserna ligger på en höjd av 120–130 m.ö.h. Det vita området i den nedre delen av figurerna markerar terränghöjden. Observera att resultaten för plats 1 har beräknats ut till ett avstånd på 25 km medan resultaten för plats 2 slutar vid 20 km. De båda platsernas terrängprofiler är för övrigt snarlika. Vi ser att skillnaderna i störpåverkan mellan plats 1 och plats 2 är mycket stor för den högsta frekvensen 1500 MHz. För 300 MHz är skillnaden mindre, men fortfarande påtaglig, medan den för 50 MHz är nästan obefintlig.

FOI-R--4895--SE

5 Obemannade sjöfarkoster

Obemannade sjöfarkoster delas i [10] in i snabbgående farkoster med vapenplattform och mera långsamtgående farkoster utan beväpning. De förra är ofta av multifunktionstyp och kan även användas som sensorplattform medan de senare farkosterna endast fungerar som sensorplattform eller realiserar andra specialförmågor som minröjning. I figur 5.1 visas ett exempel på en liten snabbgående USV (utvecklad av SAAB/Kockums). Exempel på möjliga tillämpningar för användning av USV:er inkluderar följande:

- ISTAR (*intelligence, surveillance, target, acquisition, reconnaissance*)
- Minsvep och minjakt
- Målplattform
- Generellt stöd till ytfartyg, med syftet att förstärka fartygets förmåga att lösa sina uppgifter
- Ubåtsjakt
- Skydd av hamnar och baser mot intrång
- Kommunikationsnod, som kan reläa trafik till undervattensplattformar (akustiskt) och flygande plattformar (radio)



Figur 5.1: En Piraya-USV. Foto: FOI.

Tabell 5.1: Räckvidd d baserad på beräkningar över jämn sfärisk jord (hav).

f [MHz]	h_s [m]	h_m [m]	d [km] för datatakterna 0.1 1 10 [Mbit/s]		
			0.5 [S/m]	1 [S/m]	4 [S/m]
50	1.5	1.5	18 11 –	25 15 –	47 30 –
		3	18 11 –	24 15 –	46 30 –
		10	18 10 –	23 14 –	44 28 –
300		1.5	4.9 2.8 –	4.7 2.7 –	5.4 3.1 –
		3	6.2 3.5 –	5.9 3.4 –	6.0 3.4 –
		10	11 6.2 –	10 6.0 –	11 6.2 –
1500		1.5	5.1 2.9 1.7	5.0 2.9 1.6	4.8 2.8 1.6
		3	6.9 4.0 2.3	6.9 4.0 2.3	6.7 3.9 2.2
		10	12 7.1 4.2	12 7.1 4.1	11 6.9 4.0

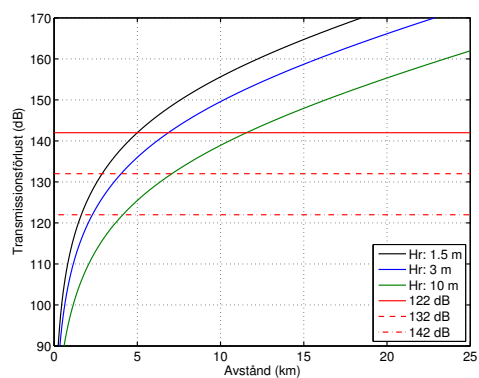
5.1 Vågutbredning på öppet hav

Vågutbredningen på öppet hav karaktäriseras av att inga terränghinder påverkar vågutbredningen mellan sändare och mottagare. Jordens sfäriska form gör dock att avståndet till horisonten är begränsat. Vi undersöker hur länkdämpningen, som funktion av avståndet, påverkas av antennhöjden och havsvattnets konduktivitet för frekvenserna 1500, 300 och 50 MHz. Vattnets konduktivitet (elektrisk ledningsförmåga) beror i första hand på salthalten, men också till viss del på vattentemperaturen. Konduktiviteten varierar i Östersjön och värdena 1 och 0.5 S/m är representativa för de södra delarna respektive i höjd med Åland. För stora oceaner är konduktiviteten ungefär 4 S/m. Sändarens antennhöjd är 1.5 m i samtliga beräkningsfall och mottagarens höjd är 1.5, 3 respektive 10 meter. De tre mottagarhöjderna kan antas representera en liten USV, ett mindre fartyg (t. ex. en bemannad eller obemannad stridsbåt) respektive ett större fartyg. Beräkningarna har utförts med en modell för jämn sfärisk jord och för vertikal polarisation.

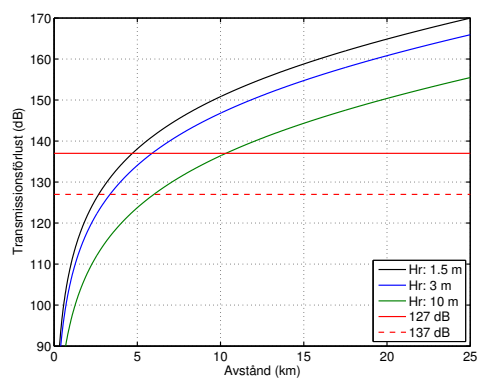
I figur 5.2 visas beräknade dämpningskurvor för en konduktivitet på 1 S/m. Trösklarna för de undersökta datatakterna är markerade med horisontella linjer. Räckvidderna ges av skärningspunkten mellan dämpningskurvorna och linjerna för tröskelvärdena. Räckvidderna för samtliga kombinationer av konduktivitet och antennhöjd för de tre frekvenserna presenteras i tabell 5.1.

Av räckvidderna i tabell 5.1 framgår att skillnaden i räckvidd för de undersökta konduktiviteterna är marginell vid 300 och 1500 MHz. Däremot har vi vid 50 MHz påtagliga skillnader i räckvidd för de olika konduktiviteterna. Räckvidderna för 0.5 S/m uppgår till ca 70–80 % av räckvidderna för 1 S/m, medan räckvidderna för 4 S/m är ungefär dubbelt så stora som för 1 S/m. Orsaken till att frekvensen 50 MHz uppvisar en hög känslighet för variationer i konduktiviteten är att lägre frekvenser har ett större bidrag från utbredningens s.k. ytvågskomponent. Ytvågskomponenten är starkt beroende av konduktiviteten.

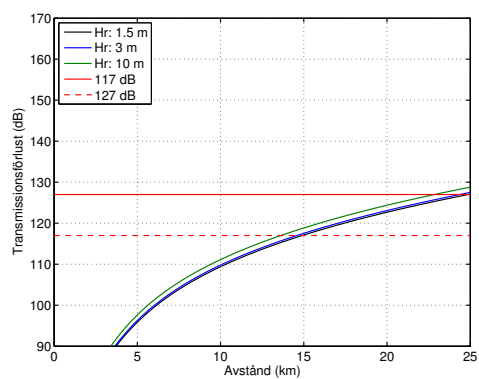
För de låga antennhöjder som studerats ger frekvensen 50 MHz signifikant längre räckvidder än de båda högre frekvenserna. Vidare noteras att antennhöjden har signifikant betydelse för räckvidden på 300 och 1500 MHz medan inga signifikanta skillnader



(a)

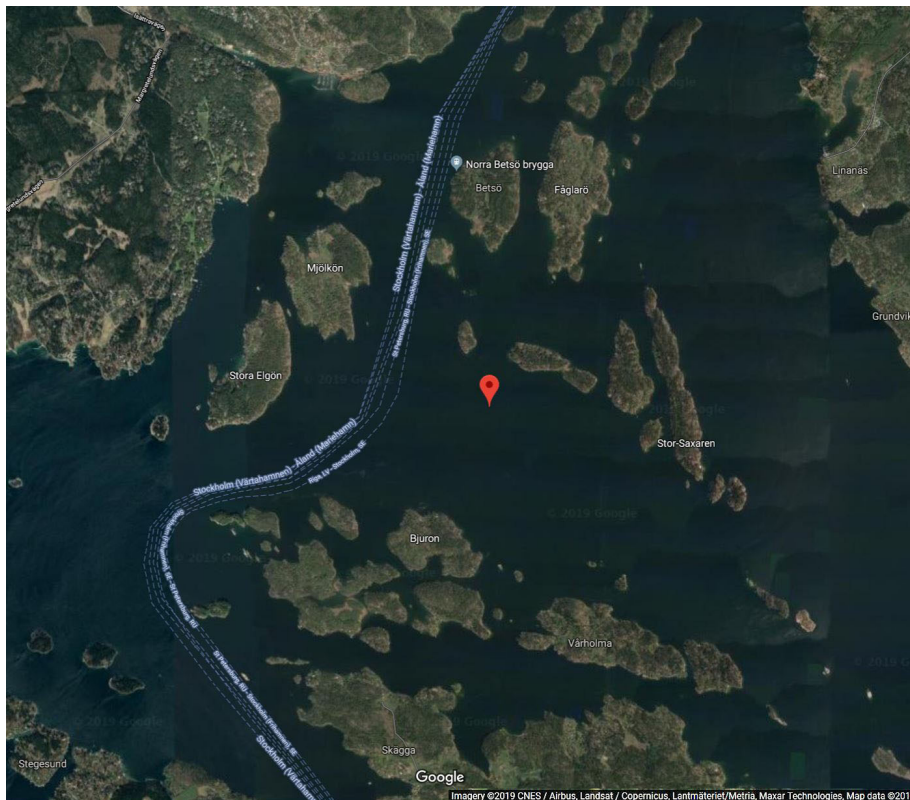


(b)



(c)

Figur 5.2: Beräknad transmissionsförlust på öppet hav för en sändare med antennhöjden 1.5 m och tre olika mottagarhöjder. Trösklarna för olika datatakter markeras av de horisontella linjerna. Frekvens: (a) 1500 MHz, (b) 300 MHz och (c) 50 MHz.



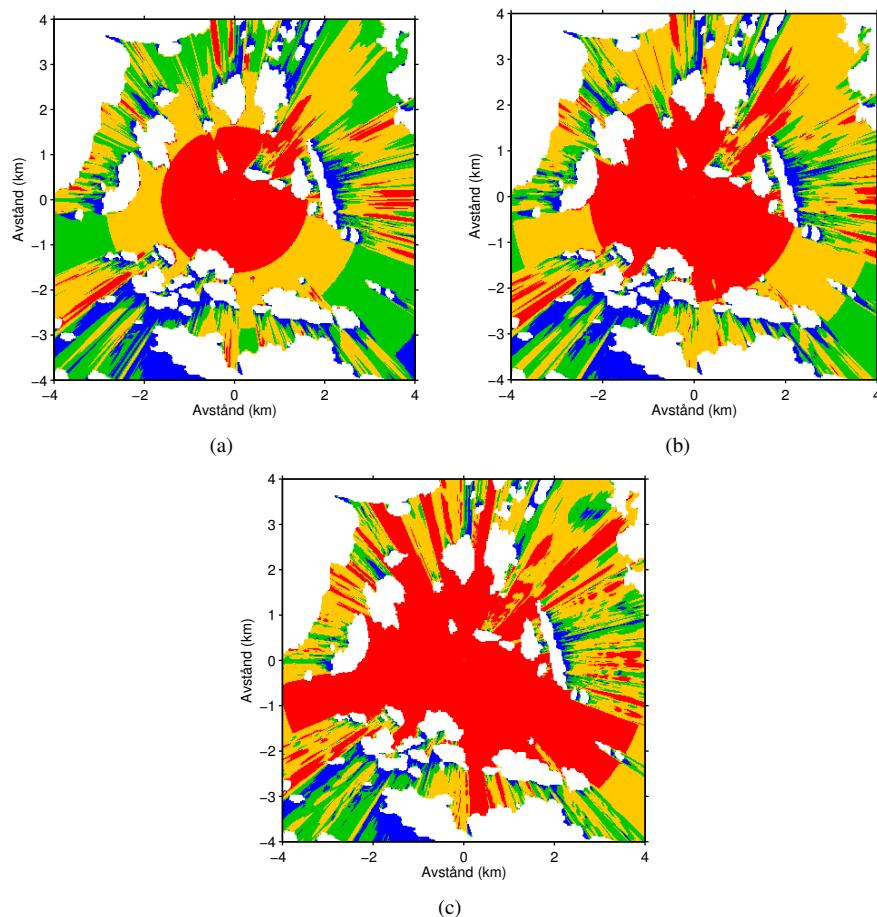
Figur 5.3: Område utanför Vaxholm. Foto Google ©2019 CNES/Airbus, Landsat/Copernicus, Lantmäteriet/Metria, Maxar Technologies.

observeras vid 50 MHz. Det är också värt att notera att 1500 MHz ger minst lika bra räckvidd som 300 MHz för de undersökta antennhöjderna.

5.2 Vågutbredning i skärgårdsmiljö

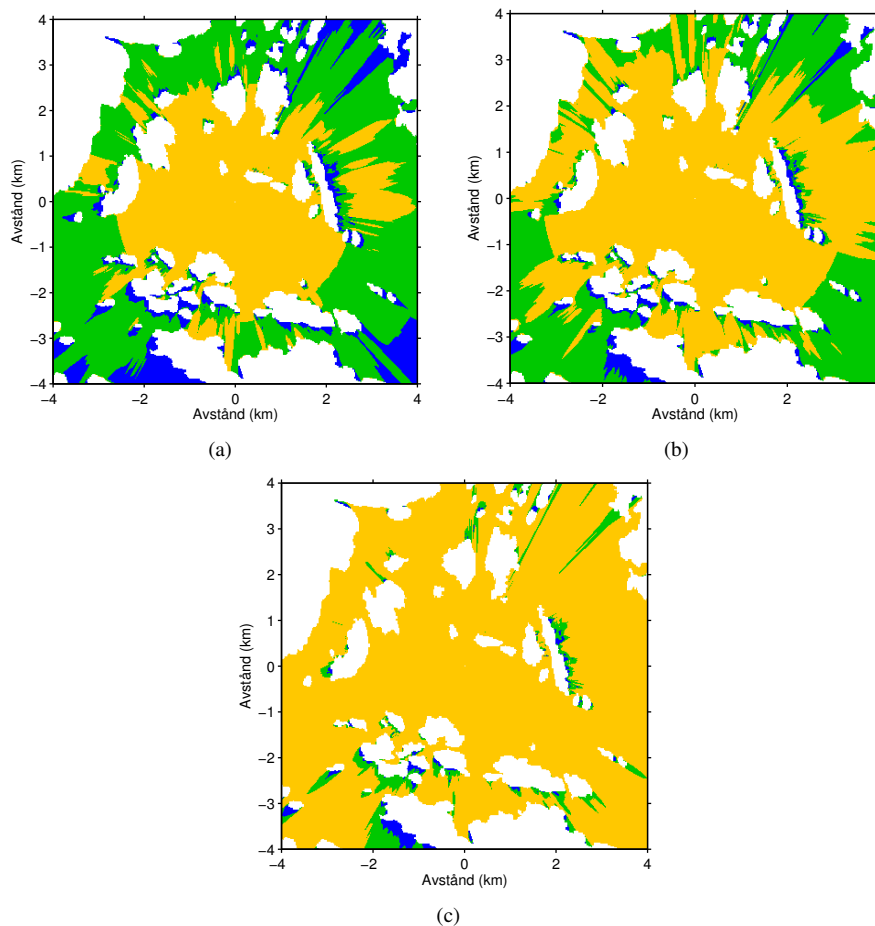
Vågutbredningen i skärgårdsmiljö är utsatt av påverkan från terränghinder i form av öar som sticker upp över havet. För att exemplifiera effekterna av dessa hinder har vi beräknat täckningsområden för en USV i ett litet skärgårdsområde utanför Vaxholm, se figur 5.3. I dessa exempel är sändaren, med antennhöjden 1.5 meter, placerad relativt fritt från de omgivande öarna. För varje undersökt frekvens har dämpningen beräknats mellan sändaren och en mottagare med antennhöjden 1.5, 3 respektive 10 meter. Resultaten från dessa beräkningar visas i figur 5.4–5.6.

Av resultaten för 1500 MHz (figur 5.4) framgår att räckvidderna för de två lägre mottagarhöjderna (1.5 och 3 m) är ungefär likvärdiga med räckvidderna för öppet hav i tabell 5.1. I områden närmast bakom öarna finns dock skuggzoner där täckningen är



Figur 5.4: Beräknat täckningsområde för olika datafaster vid 1500 MHz i ett område utanför Vaxholm. Röd 10 Mbit/s, gul 1 Mbit/s, grön 0.1 Mbit/s, blå < 0.1 Mbit/s. Vit färg markerar land. Sändaren är placerad i mitten av området och har antennhöjden 1.5 m. Mottagarens antennhöjd är: (a) 1.5 m, (b) 3 m och (c) 10 m.

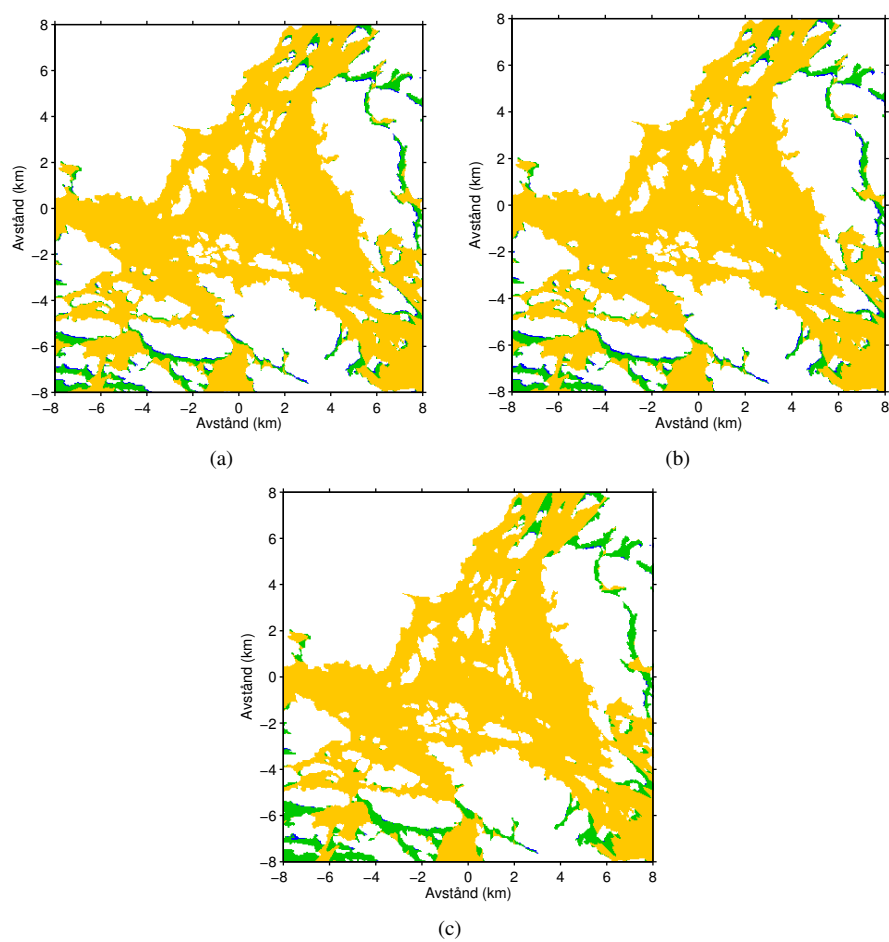
betydligt sämre. Bredden på dessa zoner varierar med höjden på de öar som skymmer. I figuren ligger de på, i storleksordningen, något hundratals meter. Vi kan också observera områden, på något större avstånd bakom öarna, där räckvidden är större än för öppet hav. Förklaringen till detta fenomen är att den mottagna signalen över öppet hav, för låga antennhöjder, består av en direktkomponent och en komponent som reflekterats i vattenytan. De två komponenterna samverkar destruktivt och den mottagna signalnivån minskar. När en ö befinner sig emellan sändaren och mottagaren kan denna, i vissa fall, skärma av den reflekterade komponenten mer än den direkta komponenten, vilket kan leda till en starkare mottagen signal. För den högsta mottagarhöjden (10 m), i figur 5.4(c), är räckvidderna kortare i förhållande till öppet hav.



Figur 5.5: Beräknat täckningsområde för olika datatakter vid 300 MHz i ett område utanför Vaxholm. Gul 1 Mbit/s, grön 0.1 Mbit/s, blå < 0.1 Mbit/s. Vit färg markerar land. Sändaren är placerad i mitten av området och har antennhöjden 1.5 m. Mottagarens antennhöjd är: (a) 1.5 m, (b) 3 m och (c) 10 m.

De beräknade täckningsområdena vid 300 MHz, som enbart beräknats för datatakterna 0.1 och 1 Mbit/s, presenteras i figur 5.5. Resultaten uppvisar stora likheter med motsvarande datatakter vid 1500 MHz i figur 5.4. Räckvidden för 1 Mbit/s är för de två lägre antennhöjderna (1.5 och 3 m) något lägre än vid 1500 MHz. För antennhöjden 10 m uppvisar frekvensen 300 MHz en signifikant bättre täckning bakom öarna.

Av resultaten för 50 MHz i figur 5.6 framgår att täckningen är betydligt bättre än för de högre frekvenserna. Fenomenet med radioskugga bakom öarna finns även här, om än i mindre omfattning.



Figur 5.6: Beräknat täckningsområde för olika datatakt vid 50 MHz i ett område utanför Vaxholm. Gul 1 Mbit/s, grön 0.1 Mbit/s, blå < 0.1 Mbit/s. Vit färg markerar land. Sändaren är placerad i mitten av området och har antennhöjden 1.5 m. Mottagarens antennhöjd är: (a) 1.5 m, (b) 3 m och (c) 10 m.

FOI-R--4895--SE

6 Teknikexempel

Olika aspekter avseende möjligheterna att förbättra kommunikationen till och från obemannade farkoster diskuteras nedan. Med förbättrad kommunikation avses ökad robusthet och störålgghet samt längre räckvidd, antingen på enskilda länkar eller genom användande av reläplattformar. En kombination av adaptiva radiosystem, som effektivt utnyttjar fördelarna med multipla antenner i flervägsutbredningsmiljöer, och relänoder med multihoppfunktionalitet är sannolikt nödvändig för att nå den dataakt, tillgänglighet och räckvidd som krävs. Vågutbredningsmodeller behöver även utvecklas för att möjliggöra utvecklingen och realistiska utvärderingar av olika radiolösningar.

6.1 Länktekniker

Generellt kan ökad robusthet fås genom användande av till exempel gruppantennor, adaptiv dataakt, bandspridning, effektkontroll och felrättande kodning. Ett sätt att göra ett radiosystem mer tåligt mot såväl avsiktlig som oavsiktlig störning är att använda någon form av bandspridning. Bandspridning sker vanligtvis genom frekvenshopp eller med direktsekvensmodulation. Gemensamt för båda teknikerna är att signalen utnyttjar ett betydligt större frekvensutrymme än vad själva informationssignalen behöver. Antennsystem kan också användas för att göra radiosystemet mera robust mot störning. Med avancerade och adaptiva gruppantennor kan en eller flera störsignaler undertryckas. MIMO-teknik (eng. *multiple-input multiple-output*) kan ge högre dataakt och ökad robusthet mot fädning i miljöer med flervägsutbredning. En enklare lösning är lobformning, då skickas energi bara ut i en viss riktning. Därigenom blir radiosignalen både svårare att upptäcka och att störa. Samtliga av dessa antenntekniker kräver antennsystem som är av storleksordningen flera våglängder för att ge en signifikant effekt, vilket kan vara svårt att realisera på mindre plattformar. På höga frekvenser är realiserbarheten bättre, men resultaten i kapitel 4 och 5 visar på stora svårigheter att använda höga frekvenser när vegetation och terränghinder skymmer förbindelsesträckan.

Vegetationen har en stor påverkan på länkdämpningen vid högre frekvenser. Även UAV:er som opererar från en UGV kommer många gånger att behöva kommunicera genom vegetation, t. ex. då UGV:n åker på en mindre skogsväg och riktningen till UAV:n inte ligger i vägens förlängning. Vågutbredningsmodeller för beräkningar av dämpning i mikrovågsområdet genom vegetation har stora osäkerheter och den specifika dämpningen för olika träslag och skogstyper är inte så väl känd. Stora skillnader beroende på väder och årstid är också att förvänta. För framtida utveckling och utvärderingar av radiosystem finns ett behov av att förbättra dessa beräkningsmodeller, samt att skaffa bättre kunskap kring vegetationens dämpningsegenskaper. Högupplösta databaser för skog- och markhöjd finns nu tillgängliga över Sverige. Datat kan potentiellt ge avsevärda förbättringar av dämpningsberäkningar, framför allt i vegetation. Befintliga vågutbredningsmodeller är dock inte konstruerade så att potentialen i de högupplösta databaserna kan utnyttjas.

6.2 Störsäker kommunikation med hög dataakt

Störsäker och svårupptäckt kommunikation med hög dataakt (över 100 Mbit/s) kan åstadkommas under frisksiktsförhållanden. Radiokommunikation på höga frekvenser (10–60 GHz) kan ge god riktverkan. Genom att våglängden är liten är det möjligt att även på små farkoster integrera gruppantennor med en smal lob och hög antennförstärkning i önskad riktning. Gruppantennor ger dessutom möjlighet att utföra adaptiv störundertyckning av störsignaler. Frekvenser kring 60 GHz har en extra hög atmosfärsdämpning [11] (15 dB/km extra länkdämpning vid markytan) vilket ger kortare kommunikationsavstånd men också fördelen att räckvidderna för signalspaning och störsändning reduceras kraftigt.

Retrokommunikation är en teknik där en laser riktas mot en UAV eller UGV och där en hörnreflektor säkerställer att lasersignalen reflekteras tillbaka i riktning mot sändaren. Informationen moduleras på den reflekterade laserstrålen genom att ändra reflektansen i hörnreflektorn.

Räckvidden för dessa radio- och lasertechniker är begränsad och påverkas av väderförhållanden. Regn påverkar radiokommunikation på dessa frekvenser och laser påverkas dessutom av dimma och rök. Men vid dålig sikt har exempelvis små UAV:er ändå svårt att genomföra spaning, övervakning och målinmätning med sina sensorer. Dämpningen på grund av regn [12] vid 60 GHz uppgår till 2.5, 5 och 17 dB/km för regnintensiteterna 4, 10 respektive 50 mm/timme. Skyfall definieras av SMHI som minst 50 mm/timme. Dessa två teknikexempel är lämpliga för små plattformar med korta kommunikationsavstånd, exempelvis när en UGV agerar bärarplattform till en multirobot-UAV eller mellan UAV:er.

6.3 Relänoder

Räckvidden och dataakterna vid kommunikationen mellan en UGV och ett bemanat fordon där operatören sitter, eller en annan UGV, begränsas av vegetationen och terränghinder. Inverkan från vegetation och terränghinder tilltar med ökande frekvens och blir mycket påtaglig för frekvenser över 300 MHz. Vid behov av längre kommunikationsavstånd skulle en UGV kunna användas som relästation och vidarebefordra meddelanden. Autonoma plattformar kan i sin ruttplanering ta hänsyn till kommunikationsbehovet och anpassa var den kör för att öka sannolikheten för att kunna kommunicera. Andra UGV:er kan även agera som relänoder och autonomt välja rutt så att de framskjutna obemannade mark- och flygande plattformarna har störst chans att kunna kommunicera med relänoderna. Ruttvalet kan då anpassas utifrån analyser av länkdämpningar beräknade från terrängkartor m.m.

Ett annat alternativ är att använda en UAV som relästation. Resultaten i kapitel 4 visar att ju högre en UAV flyger, desto större område kan den täcka med en hög dataakt. En nackdel med att flyga högt är dock att upptäcktsavståndet ökar med flyghöjden. UAV:er kan förväntas utgöra prioriterade mål och de är sårbara för kinetisk bekämpning eller telekrigsinsatser. Genom att istället använda två mindre stridstekniska UAV:er som flyger på låg höjd minskar risken för att de blir upptäckta. UAV:erna kan anpassa flyghöjden så att de har fri sikt mellan sig vilket innebär att radiokom-

munikation med långa räckvidder och/eller höga datatakter kan realiseras. För att öka räckvidden och robustheten mot bekämpning ytterligare kan fler samverkande UAV:er användas. De formar då ett ad hoc-nät med multihoppfunktionalitet. Ett sådant nät behöver inkludera algoritmer som hanterar att existerande noder försvinner och att nya noder kan införas. För ett sådant ad hoc-nät kan eventuellt ett kommunikationssystem på 10–60 GHz med gruppantenner vara av intresse. Access och ruttningsprotokoll behöver i så fall utvecklas som kan hantera sändare och mottagare med lobformande antennsystem. Konceptet med ett flygande stödnät har presenterats i [9, kap. 2] som en möjlig teknik för att markant kunna öka datatakterna i taktiska mobila radionät. I [9] undersöktes i första hand lämpliga frekvensval för länken mellan ett markfordon och en UAV i stödnätet i de fall siktlinjen mellan terminalerna blockeras av vegetation.

FOI-R--4895--SE

7 Slutsatser och rekommendationer

Robust kommunikation är en kritisk systemkomponent för obemannade farkoster. Farkosterna kan vara helt fjärrstyrda, eller mer eller mindre autonoma och det påverkar datakraven på farkostens kommunikationssystem. Farkostens kommunikationsbehov är normalt asymmetriskt, d.v.s. mer data behöver sändas från farkosten till operatören än tvärtom. Styrdata skickas till farkosten, samtidigt som farkosten skickar sensordata och eventuellt video tillbaka.

I rapporten behandlas obemannade markfarkoster och sjöfarkoster och tänkbara kommunikationssystem för farkosterna studeras utifrån möjlig datahastighet och räckvidd. Tre olika exempelsystem studeras, ett med en låg datahastighet på 0.1 Mbit/s, ett med en medelhög datahastighet på 1 Mbit/s, och ett med en hög datahastighet på 10 Mbit/s. Vidare undersöks hur valet av frekvensband påverkar resultaten genom att jämföra prestanda vid frekvenserna 50, 300 och 1500 MHz. System med datahastigheter på 10 Mbit/s antas bara vara realistiska på det högsta frekvensbandet (1500 MHz) på grund av det stora behovet av bandbredd som behövs för dessa system. Räckviddsskillnaderna mellan kommunikationssystem med olika datahastigheter är betydande. En konsekvens av detta är att en farkost med lägre datahastighetsbehov (högre grad av automation) kan operera över större ytor än en farkost med högre datahastighetsbehov.

I markfallet har en räckviddsanalys, baserad på statistisk modellering, genomförts för de olika systemen. Markfarkostens antennhöjd var 1.5 m och den antogs kommunicera med radionoder med tre olika antennhöjder (1.5, 25 och 300 m). Räckvidden för systemet med en datahastighet på 10 Mbit/s (1500 MHz), vid kommunikation med en annan markplattform (antennhöjd 1.5 m), uppgick till minst 200 m i 90 % procent av fallen. För kommunikation med radionoder på 25 och 300 m blev motsvarande räckvidder 0.5 respektive 2.5 km. För den lägsta datahastigheten (0.1 Mbit/s) blev räckvidderna för kommunikation med radionoderna på de tre höjderna (1.5, 25 och 300 m) 0.5, 1.9 respektive 14 km. De lägre frekvensbanden ger större räckvidd. Vid 50 MHz och 0.1 Mbit/s uppgick räckvidderna till 2.7, 8.3 respektive 30 km. Vidare har en störanalys med två typer av luftburna störare utförts i markfallet. Undersökningen visar att terräng och vegetation har en stor påverkan på hur utsatt mottagaren är för en störare på höga frekvenser.

I sjöfallet fås generellt bättre räckvidder än i markfallet. Över öppet hav fås en räckvidd på ca 1.6 km vid 10 Mbit/s mellan två obemannade ytfarkoster med en antennhöjd på 1.5 m. Vid kommunikation med ett större fartyg kan en högre antenn användas. För antennhöjden 10 m blir räckvidden ca 4.1 km vid 10 Mbit/s. För datahastigheten 0.1 Mbit/s uppgår räckvidderna till 4.8 och 11 km för antennhöjderna 1.5 respektive 10 m. Vid kommunikation över hav blir räckvidderna signifikant längre för frekvensen 50 MHz. För systemen med datahastigheten 0.1 Mbit/s erhålls en räckvidd på 25 km vid kommunikation med en plattform med 1.5 m antennhöjd. För denna frekvens ger de undersökta antennhöjderna liten påverkan på räckvidden.

I skärgården visar beräkningarna på sämre täckning strax bakom öarna, men signalstyrkan återhämtar sig när avståndet ökar. Genom att undersökningarna är begränsade till ett litet område utanför Vaxholm ska resultaten bara ses som exempel på effekterna i skärgårdsmiljö. Bortsett från radioskuggan nära öarna (ofta något hundratal meter),

får vi, för de undersökta avstånden, en likvärdig räckvidd med öppet hav.

Studien visar på behovet av att hitta kommunikationslösningar med förbättrade räckvidder. Det kan t. ex. göras via införande av relästationer. När sådana lösningar inte är möjliga, är det viktigt att farkosten kan vara så autonom som möjligt. Då minskar datataktsbehovet och räckvidderna ökar.

Rekommendationerna för fortsatta studier är att undersöka en UAV-stödd kommunikationslösning för höga datatacter, samt en adaptiv vågform som kan växla från en hög datatakt (för korta avstånd) till en robust lågtaktsvågform med lång räckvidd som reservförbindelse. Genom att kombinera dessa system kan höga datatacter erhållas via den UAV-stödda kommunikationen, men farkosterna kan även opereras under svårare förhållanden där UAV:er inte är tillgängliga. Dessutom kan eventuellt befintliga taktiska nät utnyttjas i det senare fallet.

A Regressionsparametrar

Tabell A.1: Parametrar för den statistiska länkdämpningsmodellen i ekvation (4.1) baserade på beräkningar i Östergötland. A och n är regressionsparametrar och σ betecknar de beräknade dämpningarnas standardavvikelsen i förhållande till regressionslinjen. h_t och h_r är sändar- respektive mottagarhöjden.

f [MHz]	Område	Avstånd [km]	h_t [m]	h_r [m]	A [dB]	n	σ [dB]
50	Östergötland	0.1–5					
	<i>utan skog</i>		1.5	1.5	100.7	4.0	4.2
	<i>normal skog</i>				102.6	3.9	5.8
	<i>utan skog</i>		3	1.5	98.6	4.0	3.9
	<i>normal skog</i>				100.6	3.9	5.6
	<i>utan skog</i>		25	1.5	84.1	3.7	2.9
	<i>normal skog</i>				86.2	3.8	4.6
	<i>utan skog</i>	2–20	300	1.5	65.0	3.7	2.7
	<i>normal skog</i>				67.1	3.7	4.1
300	Östergötland	0.1–5					
	<i>utan skog</i>		1.5	1.5	113.6	4.0	6.7
	<i>normal skog</i>				117.7	4.1	10.1
	<i>utan skog</i>		3	1.5	108.2	4.0	6.5
	<i>normal skog</i>				112.7	4.1	10.5
	<i>utan skog</i>		25	1.5	91.8	3.6	5.2
	<i>normal skog</i>				97.1	3.8	9.5
	<i>utan skog</i>	2–20	300	1.5	73.1	3.6	4.1
	<i>normal skog</i>				75.7	3.8	8.2
1500	Östergötland	0.1–3					
	<i>utan skog</i>		1.5	1.5	118.1	4.2	12.3
	<i>normal skog</i>				131.3	5.2	21.6
	<i>gles skog</i>				125.4	5.0	15.3
	<i>tät skog</i>				133.0	5.4	21.6
	<i>utan skog</i>		3	1.5	113.4	4.2	11.9
	<i>normal skog</i>				127.7	5.3	22.1
	<i>gles skog</i>				122.5	5.1	16.1
	<i>tät skog</i>				130.1	5.5	22.8
	<i>utan skog</i>		25	1.5	98.9	2.5	7.5
	<i>normal skog</i>				111.0	3.5	16.8
	<i>gles skog</i>				108.2	3.4	13.3
	<i>tät skog</i>				112.3	3.6	17.5
	<i>utan skog</i>	1–10	300	1.5	96.8	1.9	4.2
	<i>normal skog</i>				97.6	2.7	10.8

Tabell A.2: Parametrar för den statistiska länkdämpningsmodellen i ekvation (4.1) baserade på beräkningar i Jämtland. A och n är regressionsparametrar och σ betecknar de beräknade dämpningarnas standardavvikelsen i förhållande till regressionslinjen. h_t och h_r är sändar- respektive mottagarhöjden.

f [MHz]	Område	Avstånd [km]	h_t [m]	h_r [m]	A [dB]	n	σ [dB]
50	Jämtland	0.1–5					
	<i>utan skog</i>		1.5	1.5	99.1	4.0	10.6
	<i>normal skog</i>				106.2	4.1	12.4
	<i>utan skog</i>		3	1.5	97.3	4.0	10.3
	<i>normal skog</i>				104.5	4.1	12.1
	<i>utan skog</i>		25	1.5	84.6	3.9	9.0
	<i>normal skog</i>				91.4	4.1	10.5
300	Jämtland	0.1–5					
	<i>utan skog</i>		1.5	1.5	116.6	4.4	18.8
	<i>normal skog</i>				130.6	4.8	18.6
	<i>utan skog</i>		3	1.5	112.1	4.5	18.4
	<i>normal skog</i>				127.4	5.0	18.5
	<i>utan skog</i>		25	1.5	99.0	4.5	15.2
	<i>normal skog</i>				111.4	4.8	16.0
1500	Jämtland	0.1–3					
	<i>utan skog</i>		1.5	1.5	130.7	5.6	26.8
	<i>normal skog</i>				158.8	7.0	26.0
	<i>gles skog</i>				142.0	6.4	19.1
	<i>tät skog</i>				159.4	7.1	25.8
	<i>utan skog</i>		3	1.5	127.2	5.6	25.8
	<i>normal skog</i>				156.4	7.1	26.1
	<i>gles skog</i>				140.8	6.5	19.3
	<i>tät skog</i>				158.1	7.2	26.2
	<i>utan skog</i>		25	1.5	112.4	4.4	19.8
	<i>normal skog</i>				135.0	5.6	21.8
	<i>gles skog</i>				126.3	5.2	17.8
	<i>tät skog</i>				137.2	5.7	23.4

Referenser

- [1] L. Ahlin och J. Zander, *Principles of Wireless Communication*, 2:a uppl. Studentlitteratur, 1998.
- [2] J. Rantakokko *et al.*, "Adaptive techniques for tactical communication systems," FOI, Linköping, Rapport FOI-R--1340--SE, september 2004.
- [3] J. Nilsson, K. Fors, P. Holm, G. Eriksson och Åsa Waern, "Underlag för kravställning av radiosystem på plattformar," FOI, Totalförsvarets forskningsinstitut, Rapport FOI-R--4734--SE, juni 2013.
- [4] G. Eriksson, P. D. Holm och A. Hansson, "Räckviddsanalys för mobila taktiska kommunikationssystem på L-bandet," FOI, Totalförsvarets forskningsinstitut, Rapport FOI-R--4733--SE, januari 2019.
- [5] M. Levy, *Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation*, ser. IEE Electromagnetic Waves Series 45. IEE, London, UK, 2000.
- [6] P. Holm, B. Lundborg och Å. Waern, "Parabolic equation technique in vegetation and urban environments," FOI, Linköping, Report FOI-R--1050--SE, december 2003.
- [7] P. D. Holm, "Wide-angle shift-map PE for a piecewise linear terrain – a finite-difference approach," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 55, nr. 10, s. 2773–2789, oktober 2007.
- [8] P. Holm, G. Eriksson, P. Krans, B. Lundborg och E. Löfsved, "Wave propagation over a forest edge — Parabolic equation modelling vs. measurements," *Proc. PIMRC 2002*, Lissabon, Portugal, september 2002, s. 140–145.
- [9] G. Eriksson, A. Hansson, P. D. Holm och J. Grönkvist, "Vågutbredningsanalys för UAV-stöd i taktiska mobila radionät," FOI, Totalförsvarets forskningsinstitut, Rapport FOI-R--4734--SE, januari 2019.
- [10] P. Bull *et al.*, "Förstudie obemannade farkoster," FOI, Linköping, Rapport FOI-R--3319--SE, januari 2012.
- [11] ITU, "Attenuation by atmospheric gases and related effects," International Telecommunication Union, Recommendation ITU-R P.676-12, augusti 2016.
- [12] —, "Specific attenuation model for rain for use in prediction methods," International Telecommunication Union, Recommendation ITU-R P.838-3, 2005.

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se