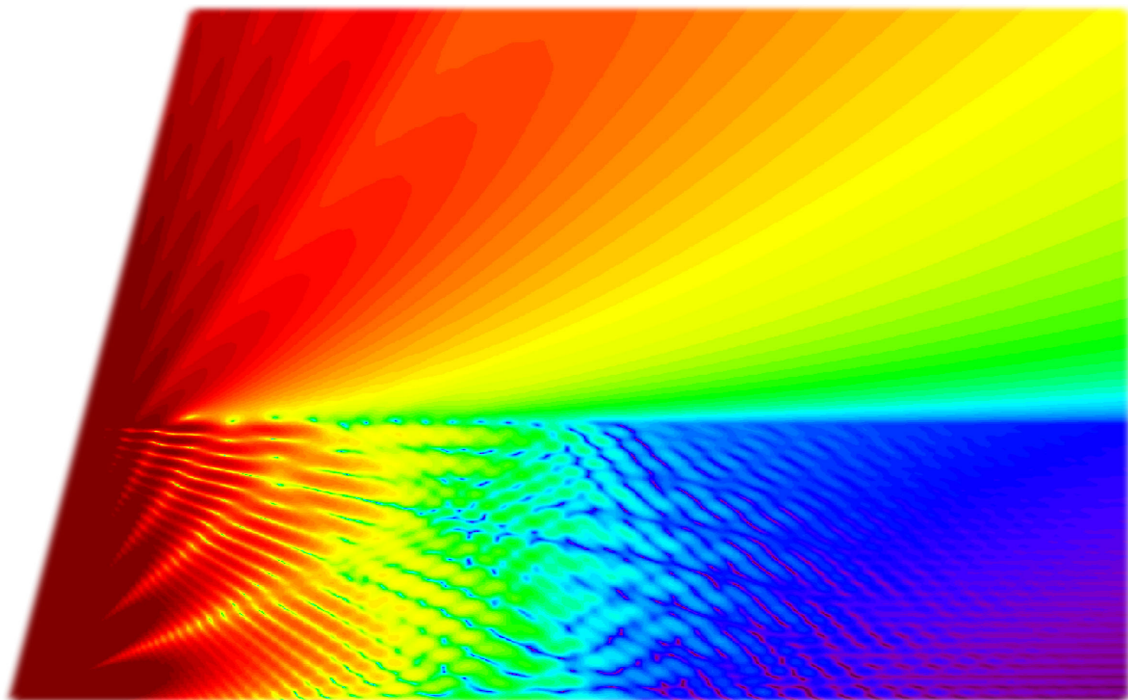


Räckviddsanalys för mobila taktiska kommunikationssystem på L-bandet

GUNNAR ERIKSSON, PETER D. HOLM,
ANDERS HANSSON



Gunnar Eriksson, Peter D. Holm, Anders Hansson

Räckviddsanalys för mobila taktiska kommunikationssystem på L-bandet

Bild/Cover: FOI

Titel	Räckviddsanalys för mobila taktiska kommunikationssystem på L-bandet
Title	Communication range analysis of mobile tactical systems in the L-band
Rapportnr / Report No.	FOI-R--4733--SE
Månad / Month	Januari / January
Utgivningsår / Year	2019
Antal sidor / Pages	37
ISSN	1650-1942
Kund / Customer	FMV
Forskningsområde	Informationssäkerhet och kommunikation
FoT område	Ledning och MSI
Projektnr / Project No.	E722963
Godkänd av / Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Ledningssystem
Exportkontroll	Innehållet är granskat och omfattar ingen information som är underställd exportkontrollagstiftningen.

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

På L-bandet är betydligt högre dataakter möjliga jämfört med frekvensområdena VHF och UHF, som traditionellt används för taktiska mobila tillämpningar. Dock avtar räckvidden markant om vegetation och terräng dämpar signalen mellan sändare och mottagare, vilket vi här undersöker närmare för två radiosystemexempel med markfordon och förankrade UAV:er.

Rapporten beskriver en räckviddsanalys för taktiska kommunikationssystem på L-bandet, dels i ett slättområde, dels i ett mer kuperat terrängområde. En statistisk analys av rädioräckvidden har utförts genom att slumpmässigt placera ut sändare och mottagare på olika avstånd i områdena och beräkna transmissionsförlusten baserat på geografisk höjd- och terrängtypsdata. Två skogstyper med olika dämpningsegenskaper har undersökts, en med dämpningsegenskaper baserade på mätningar utförda av FOI och en skogstyp enligt ITU-rekommendation för dämpning i skog.

Vi har undersökt tre olika antennhöjds kombinationer för sändare och mottagare: (1) 3–3 m, (2) 3–25 m och (3) 25–25 m. Vid 50% tillgänglighet blir räckvidderna upp till 2, 5, respektive 13 km för fallen (1), (2) och (3) i den flacka terrängen och minskar ned till ca 20–30% av dessa värden i den kuperade terrängen. För högre tillgänglighetsnivåer sjunker avstånden drastiskt till följd av den stora variationen mellan olika positioner i terrängen.

Vi beräknar även transmissionsförlusten i och ovanför ett idealiserat homogent skogsavsnitt på plan mark för att beskriva dämpningen in i skogen och upptäcktsavståndet till en luftburen signalspaningsmottagare. Upptäcktsavstånd till en luftburen signalspaningsmottagare beräknas för sändare med antennhöjd 3 m respektive 25 m, i de två fallen att sändaren står helt öppet och att sändaren är skymd av skog. Eftersom signalspanaren är luftburen minskar påverkan av såväl terränghöjd som skog och upptäcktsavstånden är betydligt längre än kommunikationsavstånden.

Nyckelord: Räckviddsanalys, transmissionsförlust, terräng, skog, L-band

Abstract

On the L-band, significantly higher data rates are possible compared to VHF and UHF, which are traditionally used for tactical mobile applications. However, the range decreases significantly if vegetation and terrain dampens the signal between transmitter and receiver, which we investigate for two radio system examples with ground vehicles and anchored UAVs.

The report describes a communication range analysis for tactical systems on the L-band, in a plain area and in a more hilly terrain area. A statistical analysis of the radio range has been performed by randomly placing transmitters and receivers at different distances in the areas and calculate the transmission loss based on geographical height and terrain type. Two types of forest characteristics with different attenuation properties have been investigated, one with attenuation properties based on measurements made by FOI and one forest type according to ITU recommendations.

We evaluate three different transmitter and receiver antenna height combinations: (1) 3–3 m, (2) 3–25 m and (3) 25–25 m. At 50% availability, the ranges are up to 2, 5, and 13 km respectively for alternative (1), (2) and (3) in the flat the terrain and decreases to about 20-30% of these values in the hilly terrain. For higher availability levels, the ranges drop drastically due to the large variation between different positions in the terrain.

We also calculate the transmission loss in and above an idealized homogeneous forest section on flat ground, to describe the attenuation in the forest and the discovery range for an airborne signal intercept sensor. Detection distances are calculated for transmitters with antenna height 3 m and 25 m, in the case where the transmitter is completely open and the case where the transmitter is obscured by forest. Since the signal intercept sensor is airborne, the effects from height and vegetation are smaller and thus the intercept distance much longer than the communication distances.

Keywords: Communication range, transmission loss, terrain, forest, L-band

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Vågutbredning i terräng och exempelsystem	9
2.1	Vågutbredning i några terrängtyper	9
2.2	Uppskattning av avståndsberoendet	11
2.3	Radiosystemexempel	11
3	Kommunikation mellan markfordon	13
3.1	Räckvidd	13
3.2	Upptäcktsavstånd	20
4	Kommunikation mellan förankrad UAV och markfordon	23
4.1	Räckvidd	23
4.2	Upptäcktsavstånd	27
5	Kommunikation mellan förankrade UAV:er	31
6	Slutsatser	35
	Referenser	37

1 Inledning

Kommunikation på L-bandet (ca 1–2 GHz) ger utrymme för större bandbredder och därmed högre kapacitet, jämfört med frekvensområdena VHF och UHF. Samtidigt ökar radiosignalens dämpning, vilket påverkar radioräckvidden negativt men förkortar upptäcktsavståndet. Båda dessa parametrar är viktiga för taktisk kommunikation och utvärderas i två typer av terräng för olika användningsfall. Normalt krävs fri sikt för en bra räckvidd mellan sändare och mottagare på dessa frekvenser men här undersöker vi närmare hur kraftigt räckvidden påverkas av terräng och vegetation. Som fiktiva exempelsystem för analysen använder vi plattformar som kan befinna sig i skog respektive trädtoppshöjd: markfordon och förankrade UAV:er. Vi har undersökt tre olika antennhöjds kombinationer för sändare och mottagare: 3–3 m, 3–25 m och 25–25 m. Det finns system med förankrade UAV:er som klarar betydligt högre höjder än trädtoppshöjd, men där kan påverkan av vegetation försummas.

De två terrängtyperna är ett relativt flackt slättområde och ett mer kuperat område. I dessa områden slumpas länkar ut för en statistisk analys av avståndsberoendet baserat på länkarnas transmissionsförluster. Beräkningarna baseras på höjd- och terrängtypsdata och har utförts med vågutbredningsprogrammet Detvag90. Höjddata ger markens höjd ovanför havsytan. Terrängtypsdata ger bl.a. skogstyp (såsom barr- eller lövskog) men även vilken höjd skogen har. Skogen betraktas sedan som en homogen skiva som ligger på marken, dvs. skogshöjden kommer att följa markens höjdvariation. Vidare måste skogsskivan ges lämpliga elektriska parametrar, dvs. en relativ dielektricitetskonstant och en ledningsförmåga, vilket bl.a. har gjorts av FOI. Lämpliga värden på parametrarna erhöles genom att anpassa länkdämpningsmätningar, som nyligen har genomförts av FOI, mot en ITU-modell för skogsdämpning. Vi gör även tvådimensionella beräkningar av transmissionsförlusten i och ovanför ett idealiserat homogent skogsavsnitt på plan mark, för att beskriva dämpningen in i skogen och upptäcktsavståndet till en tänkt luftburen signalspaningsmottagare.

2 Vågutbredning i terräng och exempel-system

För att få en uppfattning om förväntad räckvidd för frekvenser runt 1500 MHz har två områden med olika terrängtyp valts ut: ett relativt flackt slättområde och ett mer kuperat område. I dessa områden slumpas länkar ut med avstånd jämnt fördelade mellan 0.5 och 10 km på en logaritmisk skala. En statistisk analys av avståndsberoende och variabilitet görs sedan baserad på länkarnas beräknade transmissionsförluster.

2.1 Vågutbredning i några terrängtyper

Tidigare har liknande analyser av radiosystem genomförts för andra frekvensområden [1]. På samma sätt som i [1] har vi valt två 40×30 km stora terrängtyper för analysen som vi fortsättningsvis kallar terrängområde Skänninge och terrängområde Bräcke. Terrängområde Skänninge visas bild 2.1. Det ligger söder om Motala Ström i Östergötland och kan beskrivas som flack jordbruksmark, liknande sådan terräng som är vanligt förekommande i Skåne. Terrängområde Bräcke som visas i bild 2.2, ligger i nära Bräcke i Jämtland och är mycket kuperat.

Räckviddsstatistik beräknas genom att 1000 länkar slumpas ut likformigt med avseende på sändarplats och riktning till mottagaren, med mottagarens avstånd jämnt fördelade mellan 0.5 km och 10 km på en logaritmisk skala.

Beräkningarna baseras på höjd- och terrängtypsdata och har utförts vågutbredningsprogrammet Detvag90 med en beräkningsmodell som utnyttjar paraboliska ekvationer (PE-modellen), vilken tar hänsyn till effekterna av markens topografi, varierande ledningsförmåga för marken och skog, se [2, 3]. Skog får via terrängtypsdata en höjd, som varierar beroende på skogstyp (som t.ex. barr- eller lövskog). Denna höjd följer markens höjdvariation och kan ses som en tilläggshöjd till markhöjden. I PE-modellen modelleras skog som en dielektrisk skiva med en tjocklek (höjd), en dielektricitetskonstant (ϵ_r) och en konduktivitet (σ) som ges av terrängtypsdatabasen, där konduktivitet ger en liten imaginärdel i den sammansatta komplexa dielektricitetskonstanten. Absolutbeloppet av den komplexvärda dielektricitetskonstanten är nära ett, med en mycket liten imaginär del. Eftersom beloppet är något större än ett fås en brytning i gränsskiktet mellan luft och skog. Vidare ger imaginärdelen upphov till en förlust i mediet (skogen). Lämpliga värden för de dielektriska parametrarna har undersöks av FOI i [4] som dock bara baseras på ett fåtal mätningar för medeltät till tät barrskog. I det här arbetet använder vi värden för de dielektriska parametrarna från nya mätningar gjorda av FOI [5] för en skogstyp som vi här benämner gles skog och ITU-mätningar gjorda i Ryssland [6], som vi fortsättningsvis benämner tät skog, se tabell 2.1.

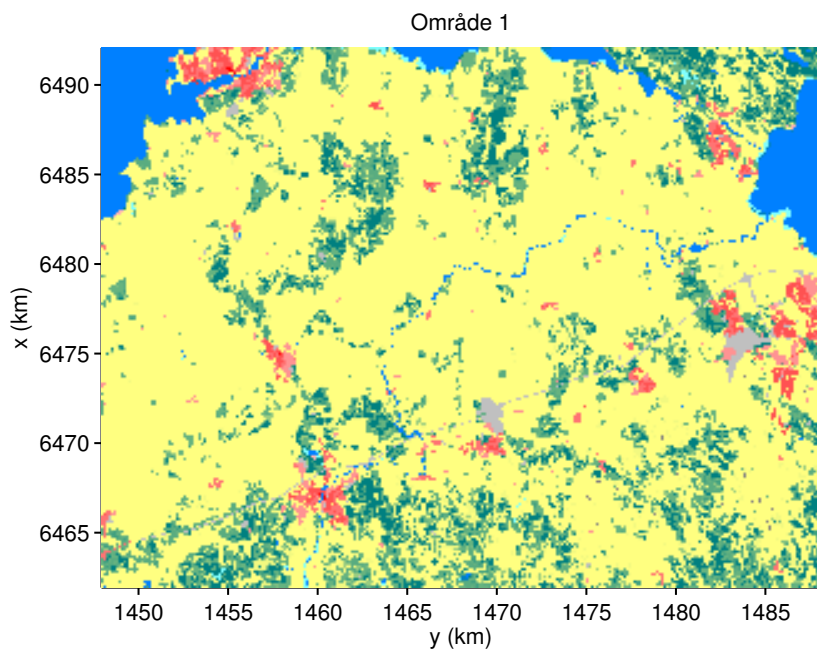


Bild 2.1: Terrängområde Skänninge i Östergötland söder om Motala Ström.

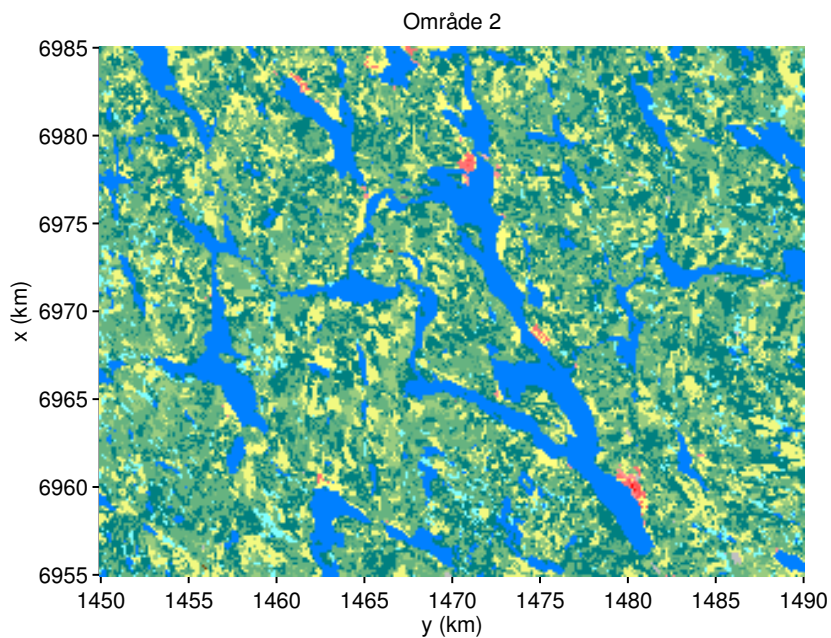


Bild 2.2: Terrängområde Bräcke i Jämtland kring Bräcke.

Tabell 2.1: Använda värden på de elektriska parametrarna för skog

Frekv. (GHz)	FOI: Gles skog		ITU: Tät skog	
	ϵ_r	σ ($\mu\text{S/m}$)	ϵ_r	σ ($\mu\text{S/m}$)
1.5	1.0186	71	1.0357	156

2.2 Uppskattning av avståndsberoendet

Från de beräknade transmissionsförlusterna kan en modell för avståndsavtagandet skattas. Avståndsberoendet för transmissionsförlusten uppskattas genom att utföra regressionsanalys på de beräknade transmissionsförlusterna, se referens [1]. Vi antar där för en modell där utbredningsdämpningen har ett potensavtagande med avståndet enligt

$$L_{\text{mod}} = a \left(\frac{d}{d_{\text{ref}}} \right)^n, \quad d_{\text{ref}} = 1 \text{ km}, \quad (2.1)$$

där a är en konstant faktor, d utbredningsavståndet och där n bestämmer modellens avståndsberoende. Konstanten a motsvarar dämpningen vid referensavståndet d_{ref} , som är satt till 1 km men som i princip kan väljas godtyckligt. Modellparametrarna a och n kan bestämmas genom att minimera summan av kvadraterna av residualerna (modelfelet) för samtliga jämförelsepunkter.

Modellen i (2.1) är dock otacksam att arbeta med eftersom den är icke-linjärt beroende av parametern n . Det kan dock lätt avhjälpas genom att logaritmera båda leden. För att (av praktiska skäl) kunna uttrycka dämpningen i decibel beräknar vi $10 \log_{10}$ av båda sidorna i (2.1) och erhåller

$$[L_{\text{mod}}]_{\text{dB}} = A + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_{\text{ref}}} \right), \quad (2.2)$$

där $A = 10 \log_{10} a$. Vi har nu en enkel modell för linjär regression, där ett linjärt samband mellan transmissionsförlust och avstånd kan anpassas till resultatet. För regressionslinjen beräknas sedan medelvärde och en standardavvikelse för transmissionsförlusten.

2.3 Radiosystemexempel

För en kommunikationslänk där sändaren har uteffekten P , ges energin per informationsbit vid mottagaren av sambandet

$$E_b = \frac{P G_{\text{sm}} G_{\text{ms}}}{LR}, \quad (2.3)$$

där G_{sm} och G_{ms} är sändarens respektive mottagarens antennvinster i riktning mot mottagaren respektive sändaren, L är länkdämpningen mellan sändare och mottagare, och R är informationsdatatakten. Utan avsiktlig eller oavsiktlig störning kan mottagarbrusets spektraltäthet, med hjälp av mottagarens systembrusfaktor F , uttryckas som

$$N_0 = kT_0 F, \quad (2.4)$$

Tabell 2.2: Parametrar för exempelsystem

R [Mbit/s]	P [dBW]	G_{sm} [dBi]	G_{ms} [dBi]	F [dB]	γ [dB]	L' [dB]
1	10	0	0	5	7	141
10	10	0	0	5	7	131

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, måste signal-till brusförhållandet (SNR) vara större än en tröskelnivå γ :

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{PG_{\text{sm}}G_{\text{ms}}}{LRkT_0F} > \gamma. \quad (2.5)$$

Detta samband kallas länkbudget och bestämmer relationen mellan radiosystemets parametrar. Vi kan beräkna möjliga värden på länkdämpningen genom att lösa ut L ur andra ledets olikhet i (2.5)

$$L < \frac{PG_{\text{sm}}G_{\text{ms}}}{RkT_0F\gamma} = L', \quad (2.6)$$

där L' betecknar den största möjliga länkdämpningen som uppfyller olikheten. Vi använder två radiosystemexempel för analysen i följande kapitel: ett smalbandigt system med datatakten 1 Mbit/s och ett bredbandigt system med datatakten 10 Mbit/s (se tabell 2.2), där värdena på systemgränsen L' har beräknats med (2.6). Systemgränsen gäller för en gausskanal och behöver kompenseras för att ta hänsyn till fädning från flervägsutbredning. För det smalbandiga och det bredbandiga systemet antar vi en fädningsmarginal på 8 dB respektive 4 dB. Skillnaden beror på att en större bandbredd möjliggör att en högre diversitetsordning kan extraheras, vilket innebär att en mindre fädningsmarginal behövs. De i räckviddsanalysen använda trösklarna för de två exempelsystemen blir då

$$L''_1 = 141 - 8 = 133, \quad (2.7)$$

respektive

$$L''_{10} = 131 - 4 = 127. \quad (2.8)$$

3 Kommunikation mellan markfordon

I det här kapitlet beräknar vi räckvidd och upptäcktsavstånd för kommunikation mellan markfordon för de två exempelsystemen i tabell 2.2. I analysen gör vi antagandet att fordonens antenner befinner sig på en höjd av 3 m över marken. I nästa två kapitel undersöks sedan kommunikation mellan en förankrad UAV och markfordon samt kommunikation mellan förankrade UAV:er.

3.1 Räckvidd

Räckviddsanalysen är baserad på transmissionsförlustvärdena som erhållits för de utslumpade länkarna i terrängområde Skänninge och Bräcke. Transmissionsförlusten presenteras som funktion av avståndet mellan sändaren och mottagaren. Resultaten är för frekvensen 1500 MHz, sändar- och mottagarhöjden 3 m. För resultaten har vidare de elektriska parametrarna i tabell 2.1 använts för skog. För att vidare kunna diskutera räckvidd måste vissa prestanda för radiosystemet vara kända.

I bild 3.1–3.3 visas simulerade transmissionsförlustvärden som funktion av avståndet för terrängområde Skänninge (se bild 2.1). Den maximala dämpningen för det smal- respektive bredbandiga systemet ges av ekvation 2.7 och 2.8 och syns i bilderna som en heldragen (L'_1) respektive streckad (L'_{10}) svart linje. De gröna ringarna markerar enskilda utfall från simuleringarna. Den röda linjen visar medianvärdet för utfallen (se ekvation 2.2) och den blå linjen anger 90 % percentilen. Medianvärdet och 90 % percentilen kan också ses som tillgänglighetsnivåerna 50 % och 90 % för varje givet avstånd. Vi ser en ganska stor spridning i utfallen, vilket beror på variationerna i terränghöjd och vegetation.

Bilderna 3.1 och 3.2 visar beräkningsresultat för gles respektive tät skog enligt tabell 2.1 och beräkningsresultaten i bild 3.3 är beräknad utan skog. Enligt bild 3.1 får vi räckvidderna 2.0 km och 1.6 km för det smalbandiga respektive det bredbandiga systemet vid tillgänglighetsnivån 50 %. Motsvarande värden för tillgänglighetsnivån 90 % är 0.6 km respektive knappt 0.5 km.

Resultatet för tät skog i bild 3.2 ger räckvidderna 1.3 km och 1 km vid tillgänglighetsnivån 50 % för det smalbandiga respektive bredbandiga systemet. Inget av systemen klarar att upprätthålla en förbindelse över 0.5 km vid tillgänglighetsnivån 90 %.

Om ingen hänsyn tas till skog fås resultatet i bild 3.3. I detta fall blir räckvidderna drygt 4 km och drygt 3 km vid tillgänglighetsnivån 50 % för det smalbandiga respektive bredbandiga systemet. Motsvarande värden för tillgänglighetsnivån 90 % är 1.5 km respektive knappt 1.2 km.

Resultaten från det mera kuperade terrängområde Bräcke (se bild 2.2) visas i bild 3.4–3.6. Beräkningsresultaten för gles skog (bild 3.4) visar på räckvidder på 0.7 och 0.5 km för det smalbandiga respektive bredbandiga systemet vid tillgänglighetsnivån 50 %. För tillgänglighetsnivån 90 % blir räckvidderna under 0.5 km för båda systemen. Resultaten från den tätare skogen (bild 3.5) ger räckvidderna under 0.5 km för båda systemen redan på tillgänglighetsnivån 50 %.

Om skogen ignoreras, det vill säga endast hänsyn tas till terrängens topografi, erhåller vi, enligt bild 3.6, räckvidderna 1.3 och 1.1 km för det smalbandiga respektive

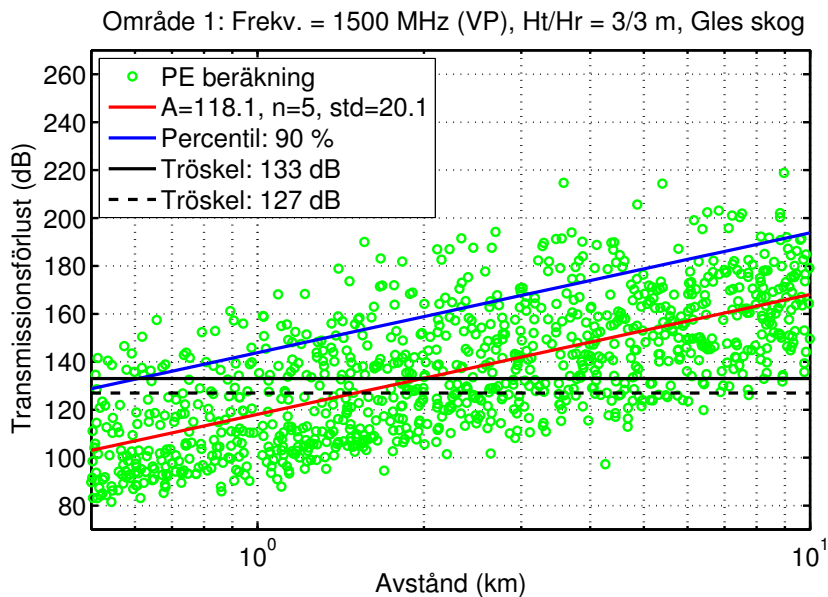


Bild 3.1: Transmissionsförlusten med parametrar för gles skog i området Skänninge för 1500 MHz och antennhöjd 3 m. Gröna ringar markerar enskilda utfall från simuleringarna. Röd linje visar medianvärdet för utfallen (ekvation 2.2) och blå linje anger 90 %-percentilen. Svarta linjer är trösklarna för det smalbandiga systemet (heldraget) det bredbandiga systemet (streckat).

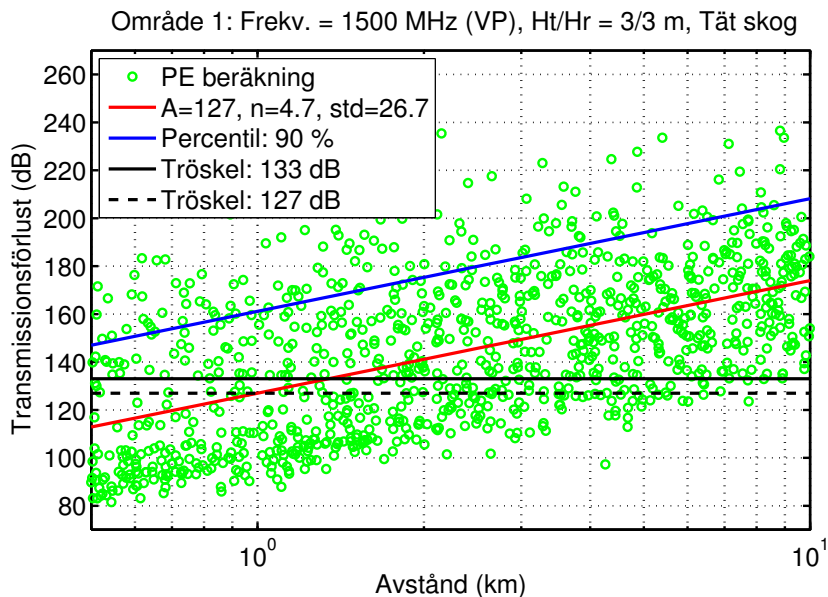


Bild 3.2: Som i bild 3.1 men för tät skog.

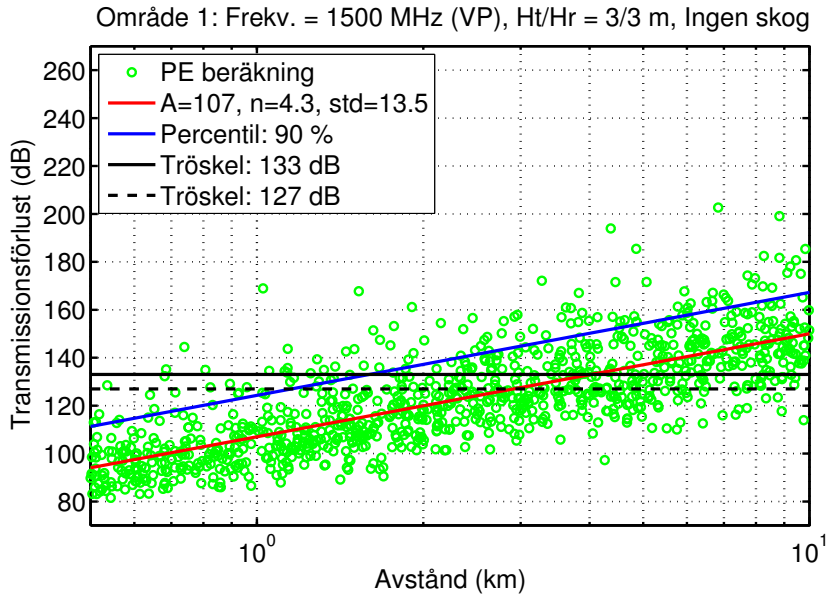


Bild 3.3: Som i bild 3.1 men utan skog.

bredbandiga systemet för tillgänglighetsnivån 50 %. Båda systemen får räckvidder under 0.5 km på tillgänglighetsnivån 90 %. Vi ser i det här fallet ett exempel på hur kraftigt radiosignaler på 1500 MHz dämpas när det kommer större terränghinder i vägen. Resultaten i bilderna sammanfattas i tabell 3.1 på sidan 19.

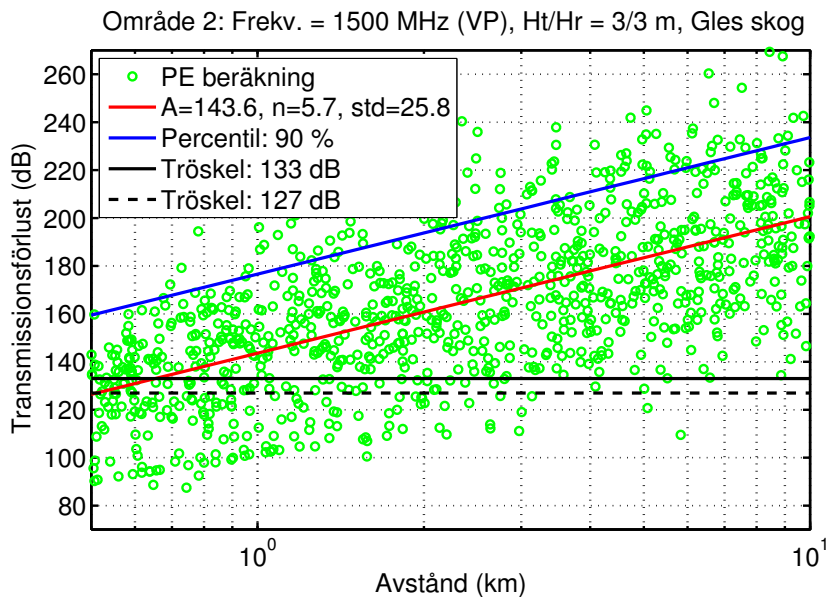


Bild 3.4: Transmissionsförlusten med parametrar för gles skog i Bräcke för 1500 MHz och antennhöjd 3 m. Gröna ringar markerar enskilda utfall från simuleringarna. Röd linje visar medianvärdet för utfallen (ekvation 2.2) och blå linje anger 90 %-percentilen. Svarta linjer är trösklarna för smalbandiga systemet (heldraget) och bredbandiga systemet (streckat).

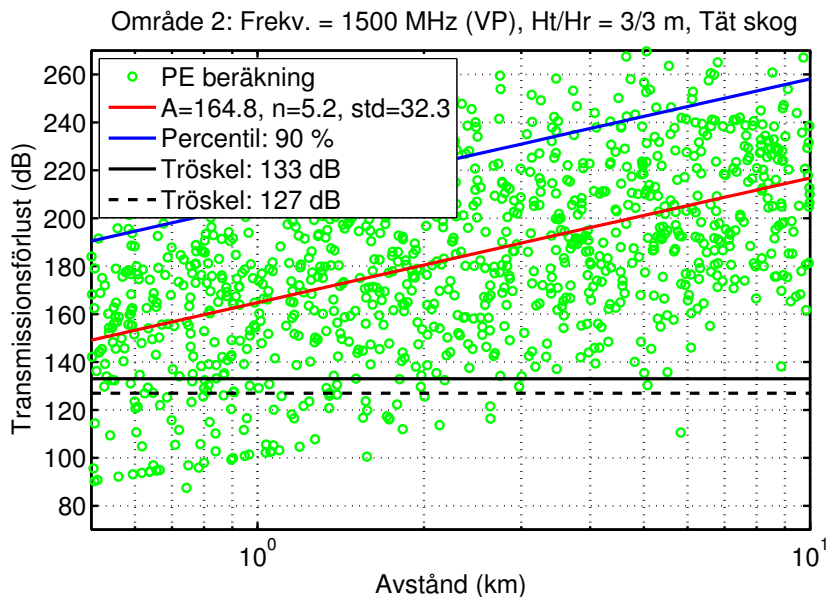


Bild 3.5: Som i bild 3.4 men med parametrar för tät skog (tabell 2.1).

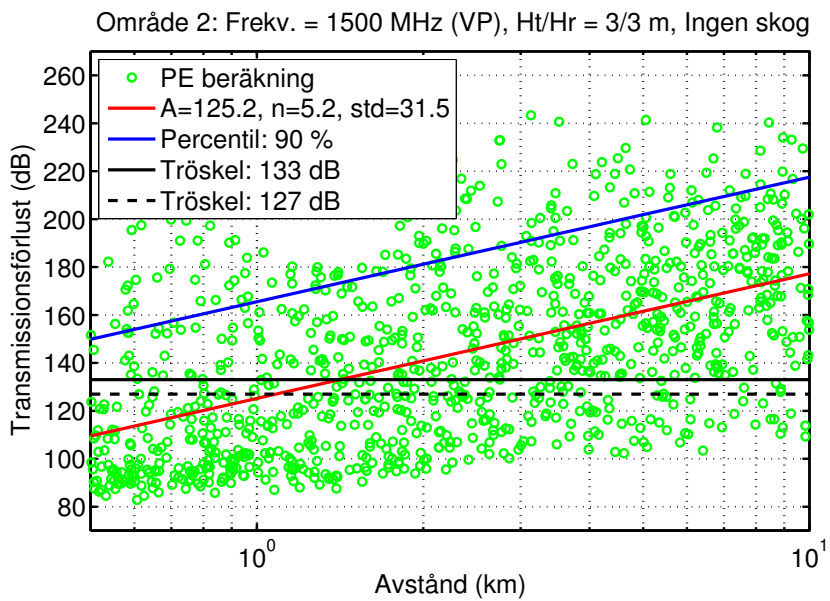


Bild 3.6: Som i bild 3.4 men utan skog.

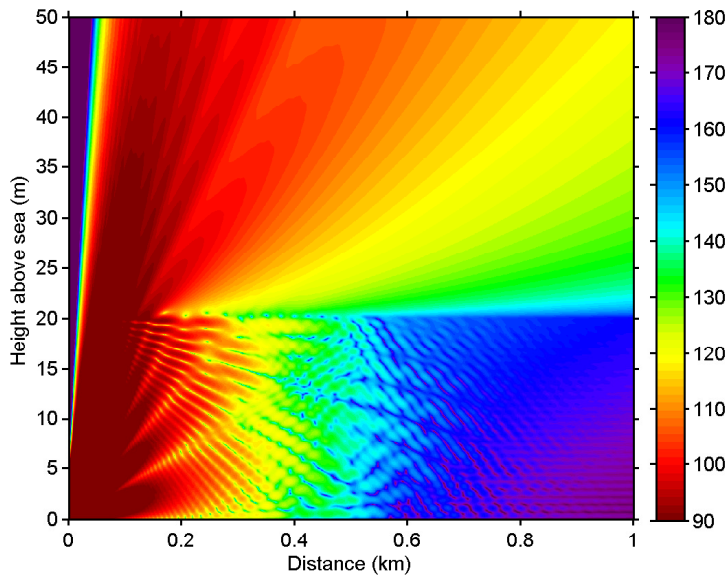


Bild 3.7: Transmissionsförlusten för en 1 km lång dielektrisk skogsskiva vid 1500 MHz och antennhöjd 3 m i gles skog.

Som ett komplement till den presenterade statistiska analysen har vi, för att i lite mera detalj undersöka skogens effekter på vågutbredningen, studerat ett idealiserat homogent skogsavsnitt på plan mark. Resultat från dessa beräkningar, för den glesa respektive täta skogen, visas i i bild 3.7 och 3.8 i form av 2D-plottar med en färgskala för transmissionsförlusten. Frekvens och sändarhöjd är 1500 MHz respektive 3 m. Skogsavsnittets höjd är 20 m. Vidare är sändaren placerat 10 m från skogskanten, dvs. sändaren står ej inne i skogen. Vi kan notera att dämpningen inne i skogen uppvisar ganska stora variationer med avseende på höjden över marken, ut till ca 700 och 350 m för fallet gles respektive tät skog. Variationerna, som beror på interferens mellan olika utbredningsvägar, är i storleksordningen 10 dB. Med våra exemplarsystem, med tröskelvärden 133 dB respektive 127 dB, erhålls räckvidderna ca 500 och 400 m för en mottagare inne i den glesa skogen för det smalbandiga respektive bredbandiga systemet. I den täta skogen skulle motsvarande räckvidder bli ca 250 respektive 200 m. Dessa värden stämmer ganska bra med kravet på 90% tillgänglighet i den statistiska analysen för motsvarande antennhöjder, där man kan anta att länkarna som hamnat i skogspartier har stor påverkan på resultatet.

Det bör observeras att de fädningsmarginaler (8 respektive 4 dB) som vi har använt för respektive system är baserade på ett antagande att fädningen är Rayleigh-fördelad samt antaganden om kanalens koherensbandbredd. Vi har i den här studien inte studerat viken fädningsstatistik som kan vara rimlig att anta i det här utbredningsfallet, eller vilken koherensbandbredd som kan råda vid utbredning över korta avstånd i skog. Interferensmönstret i bilderna antyder att signalvariationerna, som funktion av höjden, avviker starkt från en Rayleigh-fördelning. Ett bättre sätt att uppskatta trösklarna kan i

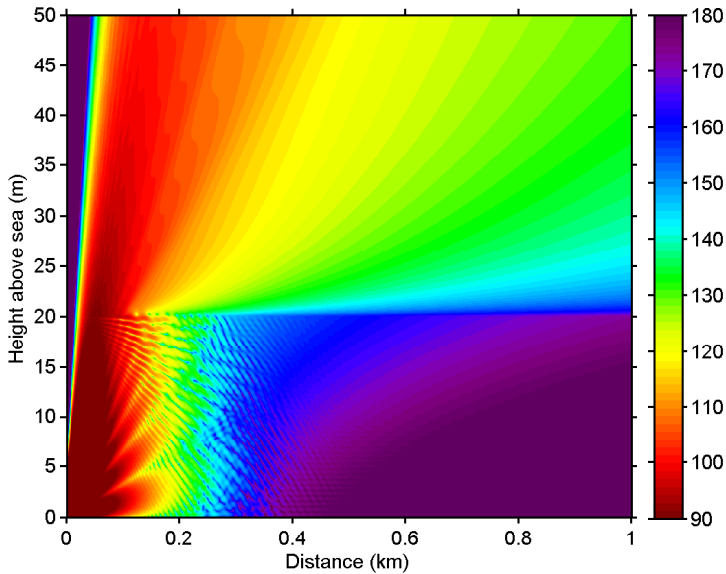


Bild 3.8: Som i bild 3.7 men för tät skog.

Tabell 3.1: Räckvidder för exemplarsystem mellan markfordon.

Bandbredd [MHz]	Tillgänglighet [%]	Räckvidd [km]					
		Skänninge			Bräcke		
		skogstyp			skogstyp		
		gles	tät	ingen	gles	tät	ingen
1	50	2.0	1.3	4.0	0.7	< 0.5	1.3
	90	0.6	< 0.5	1.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
10	50	1.6	1.0	3.0	0.5	< 0.5	1.1
	90	0.5	< 0.5	1.2	< 0.5	< 0.5	< 0.5

det här fallet vara att dra bort dessa fädningsmarginaler och i stället lägga på den observerade amplitudvariationen i höjd. Om mottagaren har diversitetsmöjligheter, från flera antenner placerade på olika höjd, kan marginalerna för höjdvariationerna minskas.

Sammanfattningsvis kan vi konstatera att våra beräknade räckvidder, för taktisk kommunikation mellan markfordon i L-bandet, är ganska begränsade. De erhållna räckvidderna, baserade på slumpvis utplacerade positioner, är sammanfattade i tabell 3.1. Jämför vi räckvidderna i de två undersökta områdena, för de fall räckvidden uppgår till minst 0.5 km i båda områdena, finner vi att de ungefärligen skiljer sig åt med en faktor tre. Skillnaden är av samma storleksordning oavsett om skogen beaktas eller inte. Det senare indikerar att en stor del av skillnaden i dämpning mellan områdena kan förklaras av skillnaden i topografi mellan områdena. Skogstypen påverkar räckvidden med en faktor 1.5 för Skänningeområdet, medan dess påverkan för Bräckeområdet inte går att fastställa eftersom räckvidderna för den tätare skogen ligger under 0.5 km.

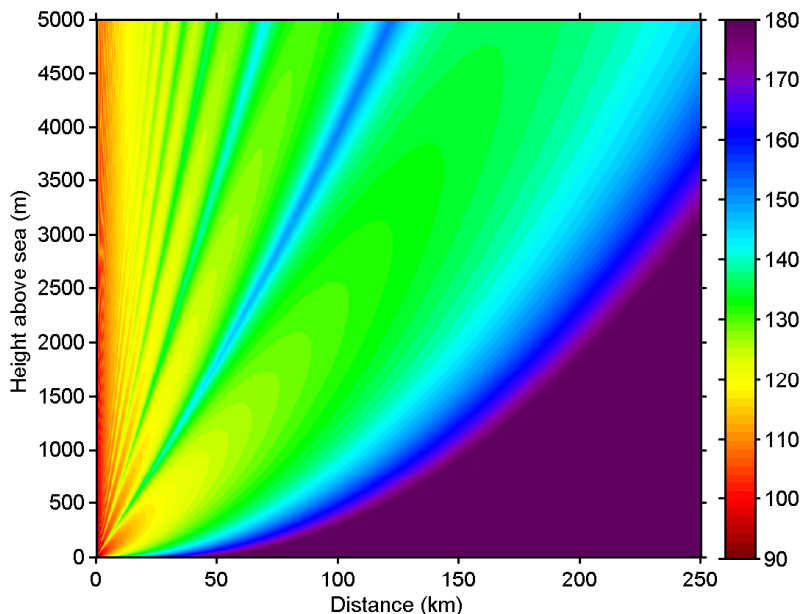


Bild 3.9: Transmissionsförlusten över jämn sfärisk jord vid 1500 MHz och antennhöjd 3 m.

3.2 Upptäcktsavstånd

En viktig aspekt för ett taktiskt radiosystem är, förutom räckvidden, upptäcktsrisken från signalspaning. Vi har tittat på möjliga upptäcktsavstånd för en upphöjd signalspanare som kan flyga nära markenheterna, till exempel en UAV. En sådan spanings-UAV har begränsad storlek och lastförmåga. Mot bakgrund av dessa begränsningar antar vi att den kan upptäcka en sändning vid en signalnivå som ligger 10 dB under känsligheten för våra exempelsystem, vilket resulterar i upptäcktströsklarna 143 dB för det smalbandiga systemet och 137 dB för det bredbandiga systemet. Upptäcktsavstånden har beräknats för två förenklade utbredningsfall. I det första fallet antar vi att sändaren står helt öppet, det vill säga att inga hinder skymmer gångvägen till spaningsmottagaren. I det andra fallet antar vi att sändaren är skymd av skog i riktningen mot spanaren. Sändaren antas här stå i, eller strax utanför, skogen.

För fallet att sändaren står öppet kan vi från beräkningsresultaten i bild 3.9 konstatera att upptäcktsavstånden kan bli mycket stora för våra antagna tröskelvärden. Signalspaningsmottagaren måste dock befinna sig ett stycke över (eller hitom) den radiooptiska horisonten. Avståndet till den radiooptiska horisonten d_h , kan approximativt beräknas som

$$d_h = 4.1 \left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2} \right) \quad [\text{km}], \quad (3.1)$$

där h_1 och h_2 är sändar- respektive mottagarantennhöjden. Om vi sätter $h_1 = 3$, och beräknar d_h som funktion av höjden h_2 , finner vi att den radiooptiska horisonten ungefär ligger i mitten av det mörkblå fältet i bilden. För avstånd under ca 50 km uppvisar

dämpningen en periodisk variation med höjden. Variationen beror på omväxlande destruktiv och konstruktiv interferens mellan den direkta och den markreflekterade signalkomponenten när gångvägsskillnaden mellan komponenterna ändras med höjden. När interferensen är konstruktiv kan den totala signalamplituden, för en idealt slät markyta, bli dubbelt så hög som för utbredning i fritt rum; en dubblering av amplituden motsvarar 6 dB lägre dämpning, eller att dubbla avståndet kan nås för samma dämpning. Det bör påpekas att modellens antagande om en perfekt slät markyta, i de flesta fall, är en grov förenkling av verkligheten. Om markens skrovlighet ökar, minskar inverkan från den markreflekterade komponenten. Möjliga upptäcktsavstånd från beräkningsresultaten i bild 3.9 beror av höjden och ligger för en signalspaningshöjd på 500 m på ungefär 65 och 85 km för det smalbandiga, respektive bredbandiga, systemet. För en spaningshöjd på 3000 m får vi upptäcktsavstånden 160, respektive 180 km. Om frirumsutbredning istället antas (ingen inverkan av markytan) blir räckvidderna 225 och 113 km för respektive system.

För fallet att sändaren är skymd av skog i riktningen mot signalspanaren visar bilderna 3.10 och 3.11 dämpningen i höjdded för gles respektive tät skog på horisontella avstånd upp till 20 km. För fritt rum kan dämpningen vid 20 km beräknas till ungefär 122 dB. Vi ser att dämpningen i bilderna är betydligt större än frirumsdämpningen. Signalspanarens trösklar för maximal dämpning, 143 dB (blått) och 137 dB (grönt), är markerade med svarta linjer i bilderna. En spanings-UAV måste befinna sig ovanför linjen för respektive system för att ha möjlighet att upptäcka signalen. Vid jämförelse med de tidigare diskuterade upptäcktsavstånden, baserade på utbredning över en sfärisk jord, blir upptäcktsavstånden signifikant kortare när sändaren är placerad i skog.

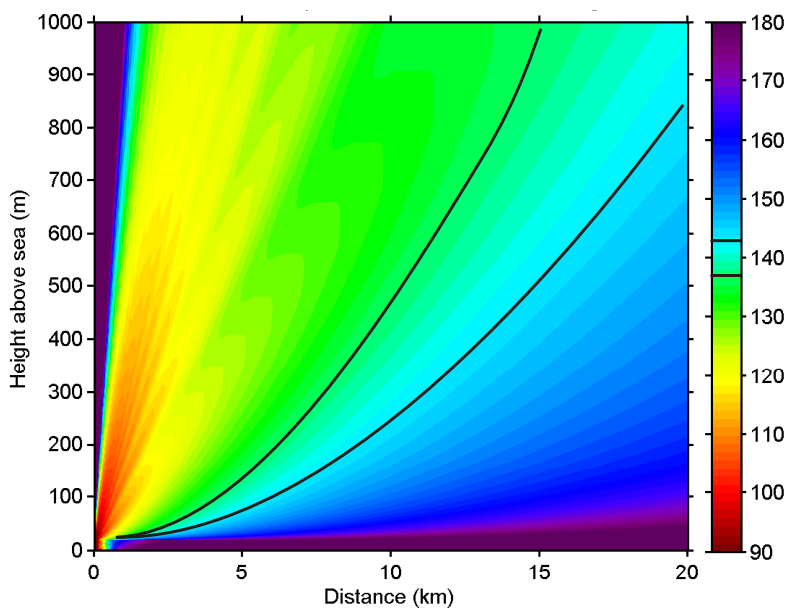


Bild 3.10: Transmissionsförlusten för en 20 km lång dielektrisk skogsskiva vid 1500 MHz och antennhöjd 3 m i gles skog.

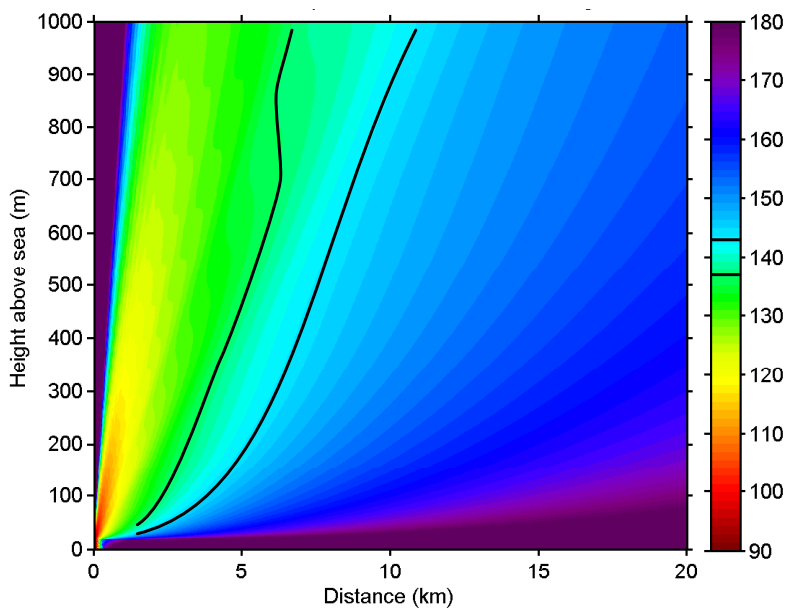


Bild 3.11: Som i bild 3.10 men för tät skog.

4 Kommunikation mellan förankrad UAV och markfordon

Vi analyserar räckvidd och upptäcktsavstånd för kommunikation mellan ett markfordon och en förankrad UAV. För analysen antas att markfordonet har en antennhöjd på 3 m och att UAV:n befinner sig på en höjd av 25 m över marken. UAV:n befinner sig därigenom alltid något över den största skogshöjd (20 m) som används i vågutbredningsberäkningarna för analysen.

4.1 Räckvidd

Vi använder i den här analysen samma exempelsystem som i analysen för kommunikation mellan markfordon i kapitel 3, dvs. dämpningströsklarna är 133 och 127 dB för det smalbandiga respektive bredbandiga systemet enligt ekvation 2.7 och 2.8.

Simulerade transmissionsförlustvärden för terrängområde Skänninge visas i bild 4.1 och 4.2, där den första bilden är för gles skog och den andra för tät skog (se tabell 2.1). Motsvarande simuleringsresultat för terrängområde Bräcke visas i bild 4.3 och 4.4. De två terrängområdena framgår av bild 2.1 och 2.2. Baserat på våra systemtrösklar och regressionslinjerna i dessa bilderna (för en tillgänglighet på 50 % och 90 %) har vi erhållit räckvidderna angivna i tabell 4.1 för respektive system i de undersökta terräng- och skogsmiljöerna.

Jämför vi räckvidder i tabellen med de som beräknats för kommunikation mellan markfordon (se tabell 3.1), ser vi att räckvidderna har ökat med minst en faktor två med hjälp av den förankrade UAV:n. Räckvidderna är dock fortfarande ganska blygsamma, i synnerhet för det mera kuperade Bräckeområdet. I detta område går det inte, trots den upphöjda antennen, att få räckvidder över 0.5 km på en tillgänglighetsnivå av 90 %.

Det kan nu vara intressant att undersöka hur inträngningen i skog påverkas av att en av antennerna befinner sig över trädtoppshöjd. I bild 4.5 och 4.6 visas beräkningsresultaten för dämpningen när den upphöjda antennen befinner sig vid kanten till ett plant och homogent skogsavsnitt. Vi ser att dämpningen inne i skogen är betydligt lägre än i de två motsvarande fallen för antennhöjden 3 m i bild 3.7 och 3.8. En annan viktig skillnad är att dämpningens beroende av avståndet i bilderna för låg antenn uppvisar ett exponentiellt beteende (konstant antal dB extra per meter), medan dämp-

Tabell 4.1: Räckvidder för exempelsystem mellan ett markfordon och en förankrad UAV.

Bandbredd [MHz]	Tillgänglighet [%]	Räckvidd [km]			
		Skänninge		Bräcke	
		gles skog	tät skog	gles skog	tät skog
1	50	5	4	1.3	0.83
	90	1.5	1	< 0.5	< 0.5
10	50	3.3	3	1	0.63
	90	1.1	0.7	< 0.5	< 0.5

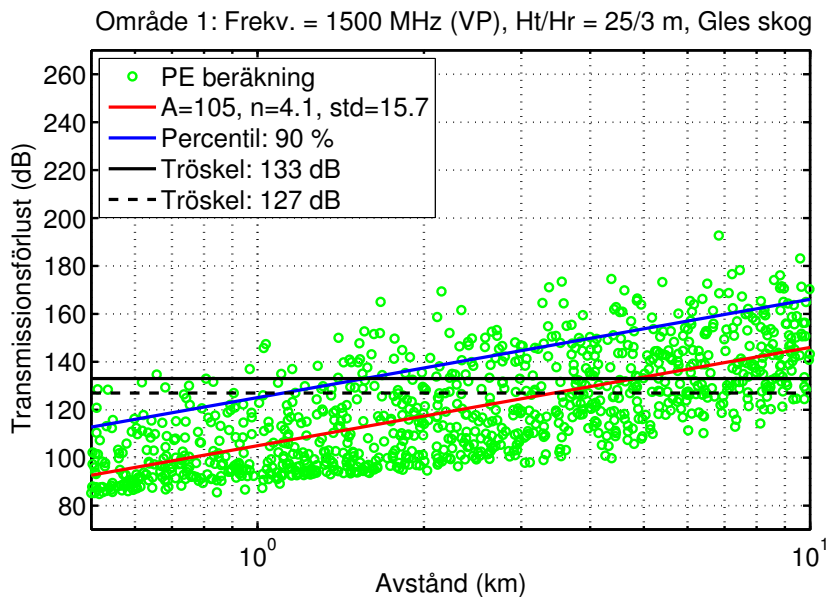


Bild 4.1: Transmissionsförlusten med parametrar för gles skog i Skänninge för 1500 MHz samt sändar- och mottagarhöjden 25 och 3 m. Gröna ringar markerar enskilda utfall från simuleringarna. Röd linje visar medianvärdet för utfallen (ekvation 2.2) och blå linje anger 90 %-percentilen. Svarta linjer är trösklarna för det smalbandiga systemet (heldraget) det bredbandiga systemet (streckat).

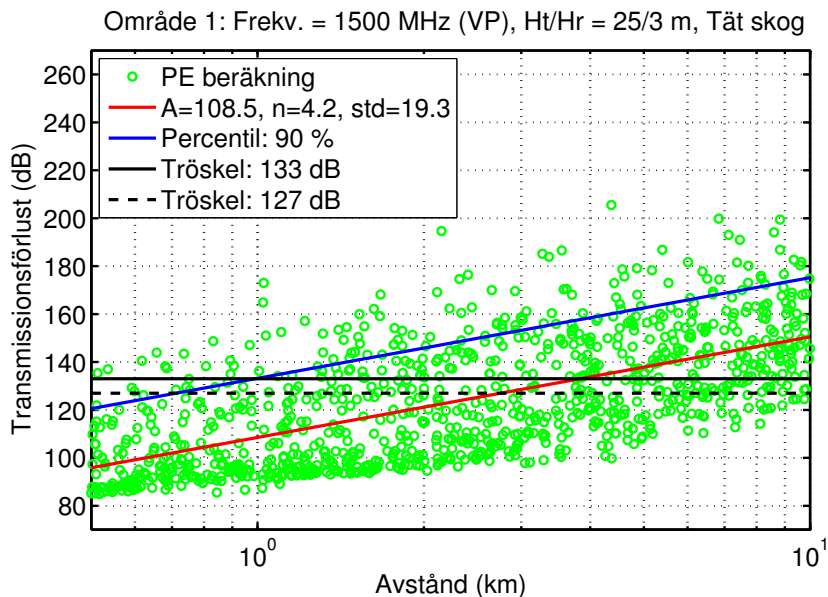


Bild 4.2: Som i bild 4.1 men för tät skog.

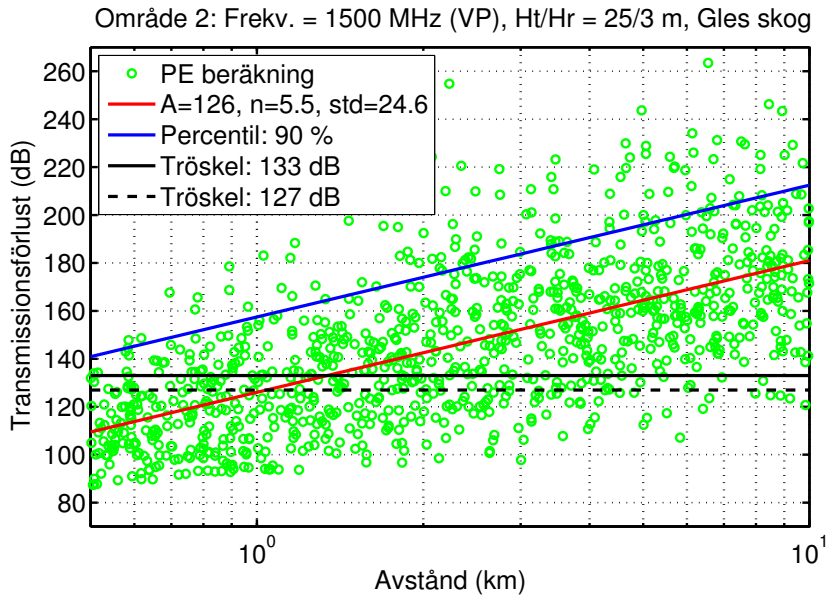


Bild 4.3: Transmissionsförlusten med parametrar för gles skog i Bräcke för 1500 MHz samt sändar- och mottagarhöjden 25 och 3 m. Gröna ringar markerar enskilda utfall från simuleringarna. Röd linje visar medianvärdet för utfallen (ekvation 2.2) och blå linje anger 90 %-percentilen. Svarta linjer är trösklarna för smalbandiga systemet (heldraget) och bredbandiga systemet (streckat).

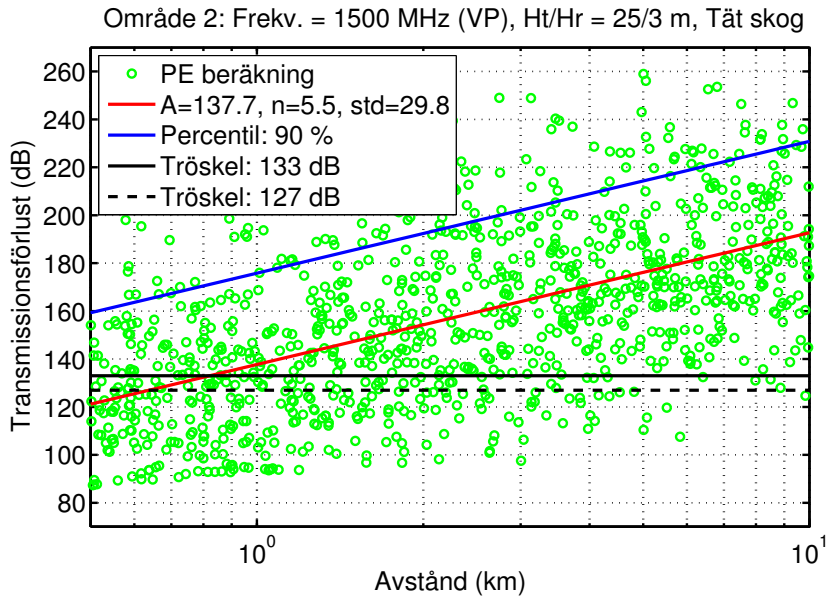


Bild 4.4: Som i bild 4.3 men för tät skog.

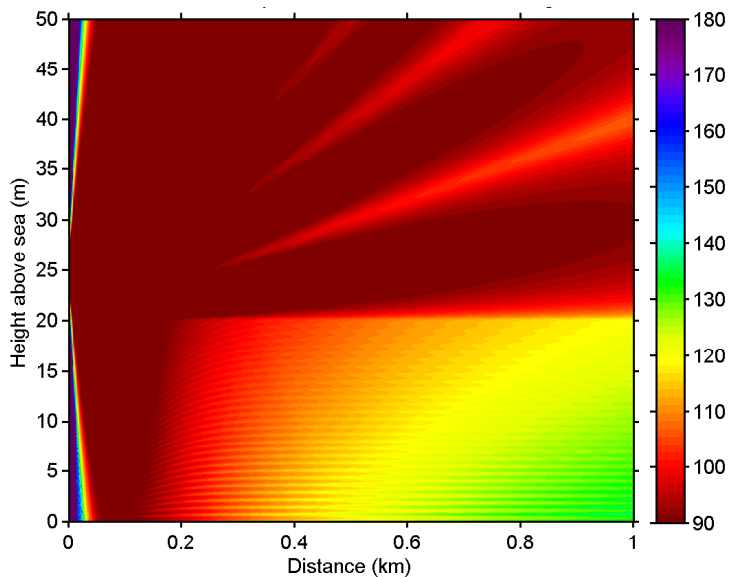


Bild 4.5: Transmissionsförlusten för en 1 km lång dielektrisk skogsskiva vid 1500 MHz och antennhöjden 25 m i gles skog.

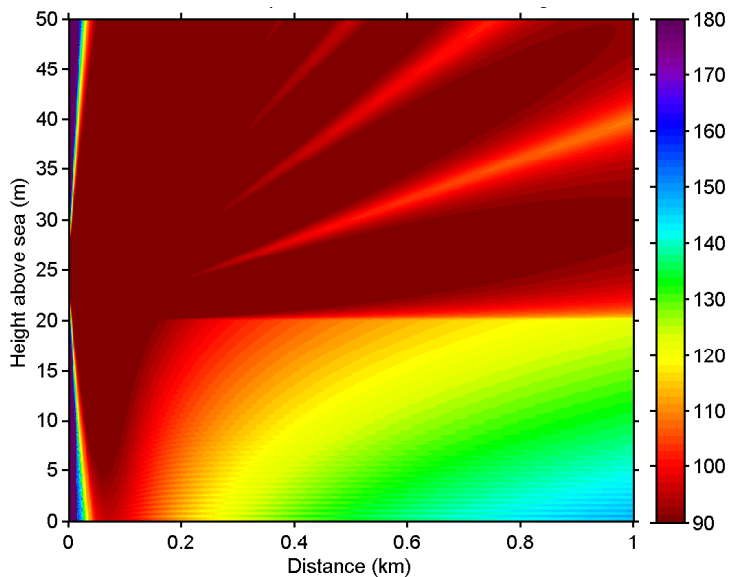


Bild 4.6: Som i bild 4.5 men för tät skog.

ningen i bilderna för antennen över skogen uppvisar ett approximativt potensbeteende med avseende på avståndet (≈ 12 dB per fördubbling av avståndet). För den upphöjda antennen blir räckvidderna i den glesa skogen ca 1 och 0.7 km för det smalbandiga respektive bredbandiga systemet. I den täta skogen blir räckvidderna ca 0.6 och 0.4 km för respektive system.

4.2 Upptäcktsavstånd

För diskussionen om upptäcktsavstånd för sändaren med den upphöjda antennen gör vi samma antagande, angående signalspanarens prestanda, som i analysen för sändarantennen placerad på ett markfordon, se avsnitt 3.2. Dessa antaganden ger att signalspanarens dämpningströsklarna är 143 och 137 dB för det bredbandiga respektive smalbandiga systemet. Vidare studerar vi även för den upphöjda sändaren två förenklade utbredningsfall. I det första fallet antar vi att sändaren står helt öppet, det vill säga att inga hinder skymmer gångvägen till spaningsmottagaren. I det andra fallet antar vi att sändaren står i eller strax utanför ett skogsområde. Jämfört med för den lågt placerade sändaren i avsnitt 3.2 är skillnaden här att antennen når upp över trädtopparna och att gångvägen mot spanaren inte är direkt skymd av skogen.

För fallet sändaren står helt öppet visas beräkningsresultaten i bild 4.7, för det idealiserade utbredningsfallet över jämn sfärisk jord, dvs. utan att varken ta hänsyn till terrängens topografi eller någon skog. Om vi beräknar den radiooptiska horisonten för detta utbredningsfall (se ekv. (3.1) s. 20) finner vi att den ligger i mitten av de mörkblå fältet. För höjder över denna ser vi en periodiskt varierande dämpning till följd av interferens mellan direkt och markreflektad signalkomponent. Jämför vi mönstret med det i bild 3.9 för antennhöjden 3 m, ser vi att dämpningen varierar snabbare med höjden på grund av den högre sändarantennen. Upptäcktsavstånden ligger i detta fall, för en signalspaningshöjd av 500 m, på ungefär 110 och 100 km för det smalbandiga respektive bredbandiga systemet. För en spaningshöjd på 3000 m är upptäcktsavstånden 220 och 210 km för respektive system. Om frirumsutbredning istället antas (ingen inverkan av markytan) blir räckvidderna 225 och 113 km för respektive system.

För fallet att den upphöjda antennen står i ett skogsområde ser vi av beräkningarna i bild 4.8 och 4.9, för respektive skogstyp, att utbredningens karaktär inte nämnvärt skiljer sig åt från fallet med utbredning över sfärisk jord. Interferensmönstret är glesare i förhållande till resultatet för den fritt placerade antennen (på höjden 25 m) men tätare än för antennen på 3 m höjd i bild 3.9. Förklaringen ligger i att den reflekterade signalkomponenten har reflekterats i den övre kanten på skogsskiktet (trädtopparna) istället för i markytan. Antennhöjden över skogsskiktet är 5 m. Resultatet ska dock tolkas med stor försiktighet eftersom skogsskiktets överkant, i en verklig skog, är mycket ojämnt och inte jämnt som antas i beräkningsmodellen. Räckvidden beräknas för detta utbredningsfall lämpligast utifrån dämpningströsklarna för frirumsutbredning, givet att spanaren befinner sig tillräckligt högt över radiohorisonten. Eftersom den upphöjda antennen befinner sig över skogen, fås här inte alls den kraftiga dämpning som noterades för den låga fordonsmonterade antennen i bild 3.10 och 3.11.

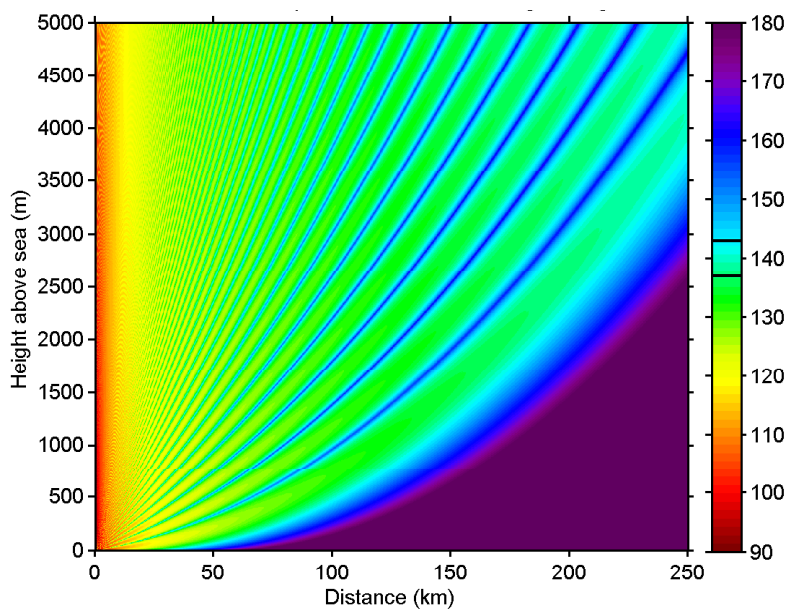


Bild 4.7: Transmissionsförlusten över jämn sfärisk jord vid 1500 MHz och antennhöjd 25 m.

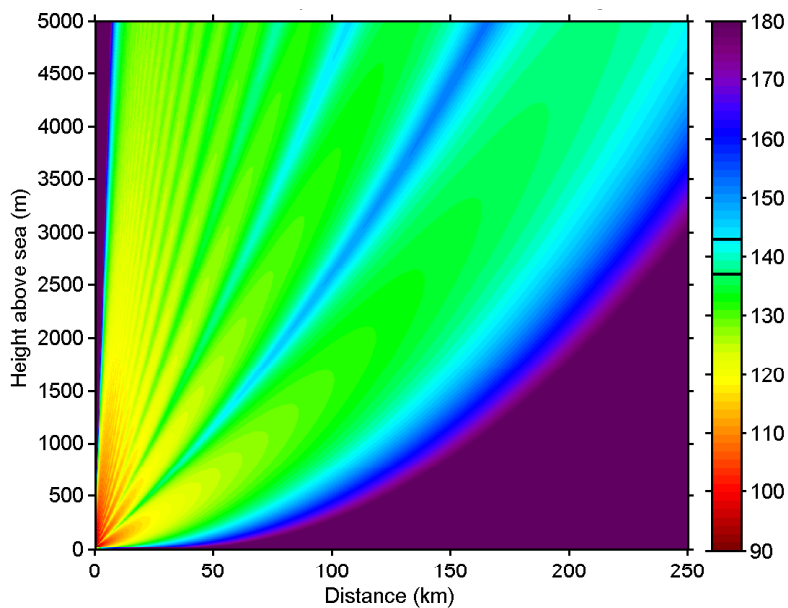


Bild 4.8: Transmissionsförlusten för en 20 km lång dielektrisk skogsskiva vid 1500 MHz och antennhöjden 25 m i gles skog.

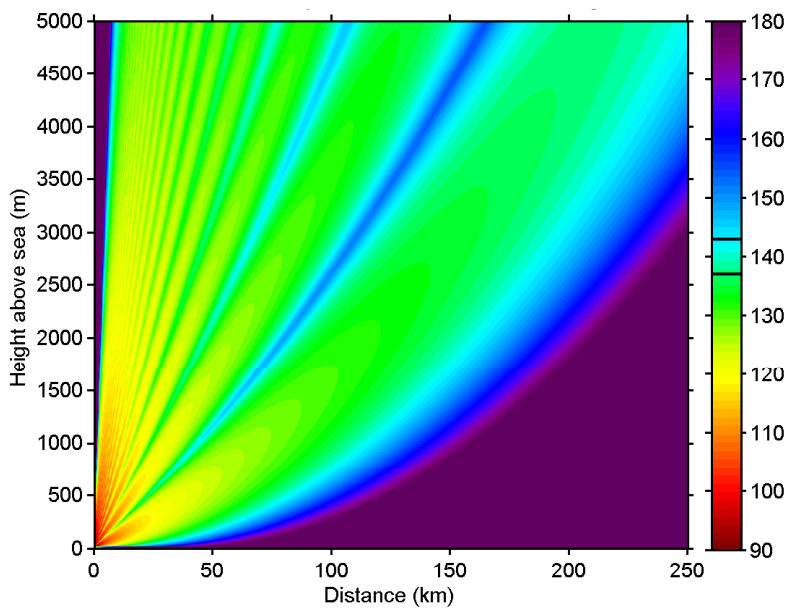


Bild 4.9: Som i bild 4.8 men för tät skog.

5 Kommunikation mellan förankrade UAV:er

Vi analyserar räckvidd för kommunikation mellan två förankrade UAV:er som befinner sig på en höjd av 25 m över marken. UAV:n befinner sig därigenom alltid något över den största skogshöjd (20 m) som används i vågutbredningsberäkningarna för analysen. Vi använder samma exempelsystem som i analyserna i kapitel 3 och 4 för kommunikation mellan markfordon, respektive mellan markfordon och UAV. Dämpningströsklarna är 133 och 127 dB för det smalbandiga respektive bredbandiga systemet enligt ekvation 2.7 och 2.8. Transmissionsförlustvärden för terrängområde Skänninge visas i bild 5.1 och 5.2, där den första bilden är för gles skog och den andra för tät skog (se tabell 2.1). En jämförelse av de båda plottarna visar att resultaten är mycket lika, dvs. skogstätheten har mycket ringa betydelse i detta fall. Vidare ser vi att spridningen i dämpning mellan olika länkar på samma avstånd är ganska liten.

Motsvarande simuleringsresultat för terrängområde Bräcke visas i bild 5.3 och 5.4. Baserat på våra systemtrösklar och regressionslinjerna i dessa bilderna (för en tillgänglighet på 50 % respektive 90 %) har vi erhållit räckvidderna angivna i tabell 5.1 för respektive system i de undersökta terräng- och skogsmiljöerna.

Räckvidden blir 10–13 km i den flacka terrängen för tillgänglighetsnivån 50 %. Vid en tillgänglighetsnivå på 90 % ligger räckvidderna på 4–7 km. I den kuperade terrängen sjunker räckvidderna till 2–3 km för tillgänglighetsnivån på 50 % och till 0.5–0.8 km för 90 %.

Tabell 5.1: Räckvidder för exempelsystem mellan förankrade UAV:er.

Bandbredd [MHz]	Tillgänglighet [%]	Räckvidd [km]			
		Skänninge		Bräcke	
		gles skog	tät skog	gles skog	tät skog
1	50	13	13	3.0	2.3
	90	7.0	7.0	0.85	0.62
10	50	10	10	2.2	1.8
	90	4.2	4.2	0.63	0.5

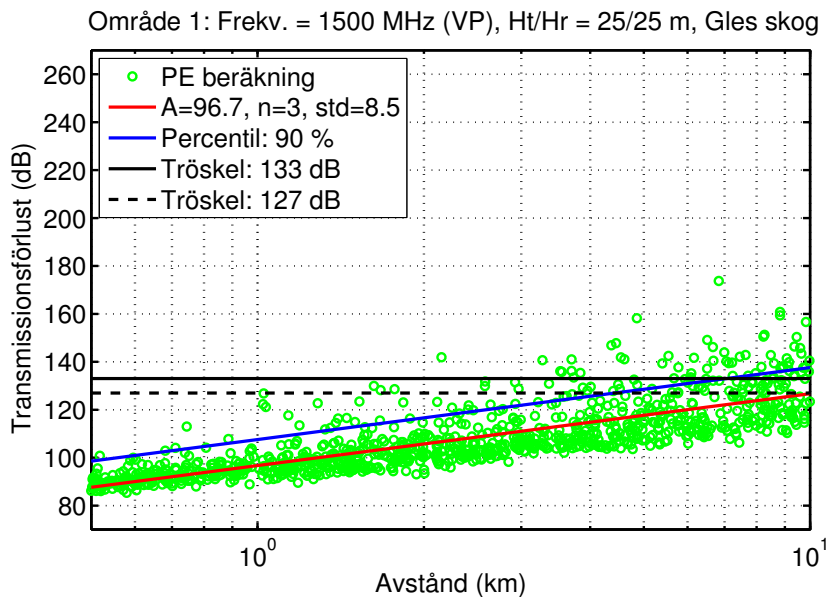


Bild 5.1: Transmissionsförlusten med parametrar för gles skog i Skänninge för 1500 MHz och antennhöjd 25 m. Gröna ringar markerar enskilda utfall från simuleringarna. Röd linje visar medianvärdet för utfallen (ekvation 2.2) och blå linje anger 90 %-percentilen. Svarta linjer är trösklarna för det smalbandiga systemet (heldraget) det bredbandiga systemet (streckat).

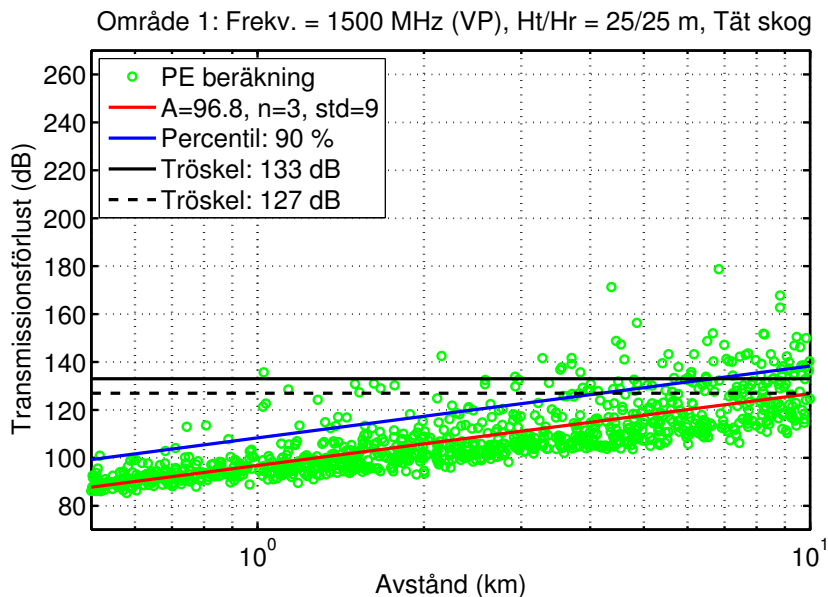


Bild 5.2: Som i bild 5.1 men för tät skog.

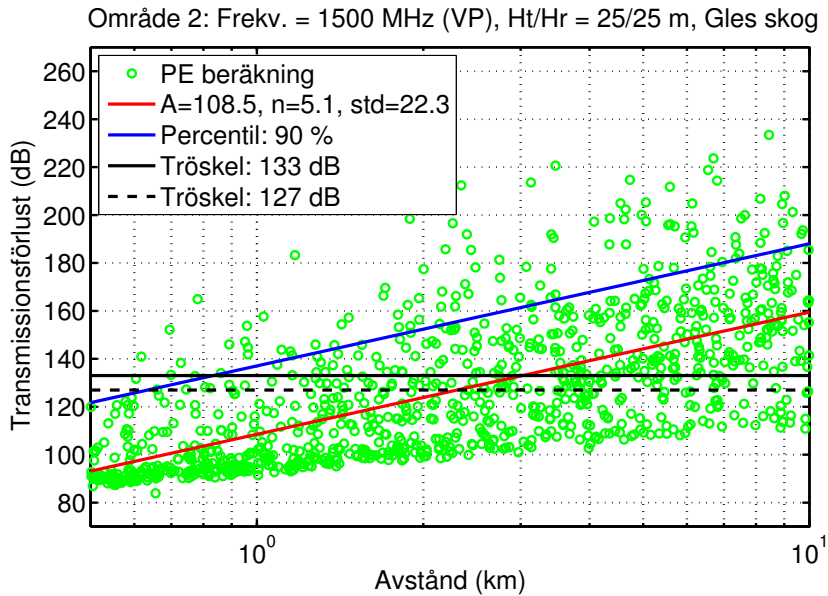


Bild 5.3: Transmissionsförlusten med parametrar för gles skog i Bräcke för 1500 MHz och antennhöjd 25 m. Gröna ringar markerar enskilda utfall från simuleringarna. Röd linje visar medianvärdet för utfallen (ekvation 2.2) och blå linje anger 90 %-percentilen. Svarta linjer är trösklarna för det smalbandiga systemet (heldraget) det bredbandiga systemet (streckat).

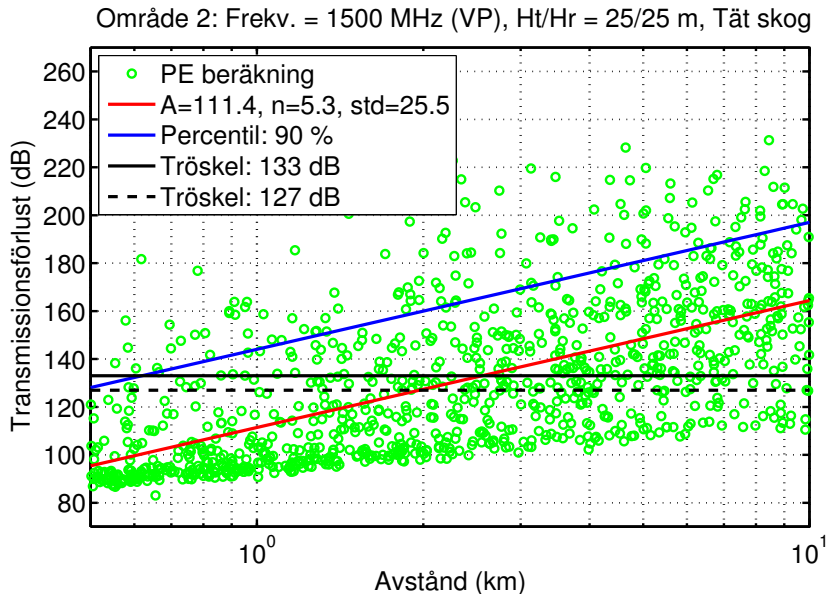


Bild 5.4: Som i bild 5.3 men för tät skog .

6 Slutsatser

Vi har studerat möjliga räckvidder för taktiska kommunikationssystem på L-bandet i två olika terrängtyper, en flack och en kuperad terräng. Den flacka terrängen har valts från ett område runt Skänninge i Östergötland och den kuperade från Bräckeområdet i Jämtland. Studien har utförts genom att slumpmässigt placera ut radiostationerna i dessa försöksområden. Det som lockar med L-bandet är hoppet om hög dataakt, vilket är svårt att uppnå i VHF- och UHF-området. Nackdelen är den höga dämpningen, om inte fri sikt råder. Skog ger för signaler i L-bandet hög transmissionsdämpning och beror starkt på skogens täthet. Två exempel på olika skogstätheter har undersökts. Det ena exemplet är baserat på mätningar utförda av FOI i en skog i Östergötland. Det andra exemplet kommer från en ITU-rekommendation som är baserad på mätningar i närheten av St Petersburg. Vi refererar i rapporten till skogstyperna som *gles* respektive *tät* baserat på deras dämpningsegenskaper och inte deras egentliga täthet. Vi har undersökt tre olika antennhöjds kombinationer för sändare och mottagare: (1) 3–3 m, (2) 3–25 m och (3) 25–25 m. Det kan ses som typiska exempel för kommunikation mellan två markfordon, mellan markfordon och en förankrad UAV samt mellan två förankrade UAV:er.

Våra beräkningar ger att räckvidderna för kommunikation mellan markfordon (dataakt 1–10 Mb/s) är 1–2 km i den flacka terrängen för tillgänglighetsnivån 50 %. Vid tillgänglighetsnivån 90 % ligger räckvidderna som mest på 0.6 km (gles skog). I den kuperade terrängen sjunker räckvidder till 0.5–0.7 km (gles skog) för tillgänglighetsnivån 50 % och till under 0.5 km för 90 %.

Beräkningarna för kommunikation mellan ett markfordon och en förankrad UAV ger räckvidder på 3–5 km i den flacka terrängen för tillgänglighetsnivån 50 %. Vid tillgänglighetsnivån 90 % ligger räckvidderna på 0.7–1.5 km. I den kuperade terrängen sjunker räckvidder till 0.6–1.3 km för tillgänglighetsnivån 50 % och till under 0.5 km för 90 %.

Beräkningarna för kommunikation mellan förankrade UAV:er ger räckvidder på 10–13 km i den flacka terrängen för tillgänglighetsnivån 50 %. Vid tillgänglighetsnivån 90 % ligger räckvidderna på 4–7 km. I den kuperade terrängen sjunker räckvidder till 2–3 km för tillgänglighetsnivån 50 % och till 0.5–0.8 km för 90 %.

Ytterligare ett utbredningsfall som vi studerat är det för kommunikation inne i en plan homogen skog. För antennhöjderna 3–3 m får vi räckvidder på ungefär 0.4 och 0.2 km för den glesa respektive täta skogstypen. För antennhöjderna 25–3 m får vi räckvidder på ca 0.7–1 km i den glesa skogstypen och 0.4–0.6 km i den täta. Dessa värden stämmer väl överens med kravet på 90% tillgänglighet i den statistiska analysen för motsvarande antennhöjder.

Vi ger också exempel på vilka upptäcktsavstånd en fiktiv luftburen signalspaningsmottagare kan erhålla mot sändare med antennhöjder som i räckviddsundersökningarna. Upptäcktsavstånden har beräknats för två utbredningsfall. I det första fallet antar vi att sändaren står helt öppet och i det andra att sändaren är skyddad av skog. För en sändare i ett markfordon, som står öppet, får vi upptäcktsavstånden 65–85 km och 200–250 km för en spaningshöjd på 500 m respektive 5000 m. Om sändaren istället är skyddad av skog (gles) blir upptäcktsavstånden 10–15 km och 15–20 km för en

spaningshöjd på 500 respektive 1000 m. Är skogen i stället av den täta typen blir upptäcktsavstånden ca 5–10 km för spaningshöjder på 500–1000 m.

För en sändare i en förankrad UAV, som står öppet, blir upptäcktsavstånden 100–110 km för en spaningshöjd på 500 m och något över 250 km för en spaningshöjd på 5000 m. Om den förankrade UAV:n står i, eller vid kanten av en skog, blir upptäcktsavstånden 80–100 km och något över 250 km för spaningshöjderna 500 respektive 5000 m. Ingen signifikant inverkan av skogstypen har noterats i detta fall. Vi noterar att för en sändare i en förankrad UAV, där antennen når över trädtopparna, blir skogens inverkan på upptäcktsavståndet mycket marginell.

Sammanfattningsvis kan vi konstatera att den kraftiga dämpning i terräng och skog ger väldigt korta kommunikationsräckvidder, vilket inte är oväntat. En flygande signalspanare kan trots detta upptäcka systemet på relativt långa avstånd.

Referenser

- [1] J. Nilsson, K. Fors, P. Holm, G. Eriksson, and Å. Waern. Underlag för kravställning av radiosystem på plattformar. Rapport FOI-R--3699--SE, FOI, Linköping, Sweden, juni 2013.
- [2] M. Levy. *Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation*. IEE Electromagnetic Waves Series 45. IEE, London, UK, 2000.
- [3] Peter D. Holm. Wide-angle shift-map pe for a piecewise linear terrain – a finite-difference approach. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 55(10):2773–2789, okt. 2007.
- [4] P. Holm, B. Lundborg, and Å. Waern. Parabolic equation technique in vegetation and urban environments. Report FOI-R--1050--SE, FOI, Linköping, Sweden, dec. 2003.
- [5] G. Eriksson, A. Hansson, P. Holm, and J. Grönkvist. Vågutbredningsanalys för uav-stöd i taktiska mobila radionät. Report FOI-R--4734--SE, FOI, jan. 2019.
- [6] ITU. Attenuation in vegetation. Recommendation ITU-R P.833-9, sept. 2016.

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