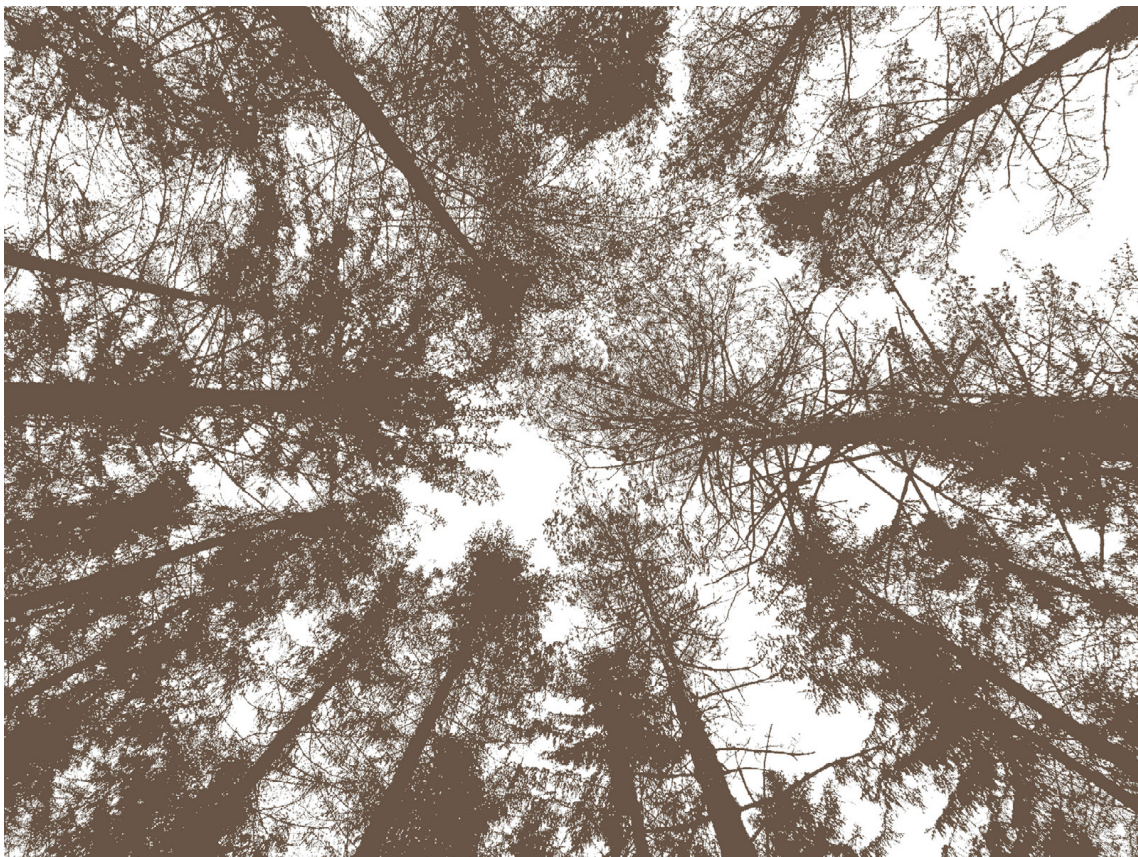




Vågutbredningsanalys för UAV-stöd i taktiska mobila radionät

GUNNAR ERIKSSON, ANDERS HANSSON,
PETER D. HOLM, JIMMI GRÖNKVIST



Gunnar Eriksson, Anders Hansson, Peter D. Holm,
Jimmi Grönkvist

Vågutbredningsanalys för UAV-stöd i taktiska mobila radionät

Bild/Cover: FOI

Titel	Vågutbredningsanalys för UAV-stöd i taktiska mobila radionät
Title	Analysis of wave propagation for UAV:s supporting tactical mobile networks
Rapportnr / Report No.	FOI-R--4734--SE
Månad / Month	Januari / January
Utgivningsår / Year	2019
Antal sidor / Pages	43
ISSN	1650-1942
Kund / Customer	FMV
Forskningsområde	Informationssäkerhet och kommunikation
FoT område	Ledning och MSI
Projektnr / Project No.	E722967
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

Arbetet består av två delar, där en del behandlar möjliga räckvidder i ett stödnät med autonoma UAV:er och den andra delen redovisar nya mätresultat för länkdämpning genom skog för GHz-området. Ett lågflygande stödnät bestående av autonoma UAV:er kan använda högre frekvenser än dagens taktiska radionät eftersom länkarna mellan UAV:erna hamnar i fri sikt ovanför besvärlig terräng. Detta ger möjlighet till en ökad kapacitet i nätet, om inte signalens dämpning i vegetation mellan UAV och markfordon blir för stor. Därför analyserar vi vågutbredningen mellan ett markfordon i skogsterräng och en UAV. Resultaten visar på stora skillnader i länkdämpning beroende på frekvensband och skogstäthet. Beräkningarna visar att transmissionsförlusten mellan markfordon och UAV är tillräckligt låg för vårt systemexempel vid frekvenser upp till 1500–2500 MHz, men för 2500 MHz krävs riktantenner och högre UAV-höjder.

För att kunna skatta räckvidder tillförlitligt i skog har en mätning genomförts. Mätmetoden för skogsdämpning utnyttjar befintliga signaler från satellitnavigeringssystem och är därför enkel och kan utföras med billig utrustning. Mätresultaten ger lägre dämpningar i skog än dämpningarna från den ITU-modell som vi jämför med.

Nyckelord: UAV-nät, taktiska mobila radionät, vågutbredning, skog, transmissionsförlustmätningar

Abstract

The work consists of two parts, one part evaluating possible ranges in a battalion network supported by autonomous UAVs and the second part describing new measurement results for link attenuation in forest for GHz frequencies. A network consisting of autonomous low-flying UAVs can use higher frequencies than today's tactical radio networks because the links between the UAVs are above the difficult terrain. Such solutions provides the opportunity to increase the capacity in the network, if the attenuation of the signal through vegetation between UAVs and ground vehicles not become too large. Therefore, we analyze the wave propagation between a ground vehicle in forest terrain and a UAV. The results show large differences in link loss depending on frequency bands and forest density. The calculations show that the transmission loss between ground vehicles and an UAV is low enough for our system examples at frequencies up to 1500–2500 MHz, but for 2500 MHz, directional antennas and higher UAV heights are required.

Our measurement method for forest attenuation utilizes satellite navigation systems signals, is therefore simple, and can be performed without expensive equipment. The measurement results provides lower attenuation in forest than the ITU model that we compare with.

Keywords: UAV network, tactical mobile radio networks, forest, transmission loss measurements

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Flygande stödnät	9
2.1	Länk mellan UAV och markfordon	9
2.2	Länkar mellan UAV:erna	10
3	Analys av länken mellan markfordon och UAV	11
3.1	Radiosystemexempel	11
3.2	Beräkning av länkdämpning	12
3.3	Räckvidder för olika flyghöjder	17
3.4	Slutsatser	17
4	Vågutbredning i skog	19
4.1	ITU modellen	19
4.2	PE-modellen	20
4.3	Transmission i skog beskriven som en dielektrisk skiva	21
4.3.1	Skogens elektriska parametrar	21
4.3.2	Dämpning av intern plan våg	22
4.3.3	Dämpning av externt infallande plan våg	22
4.3.4	Samband mellan dielektriska parametrar och dämpning	23
5	Mätning av skogsdämpning med hjälp av signaler från naviga- tionssatelliter	25
5.1	Mätmetod	25
5.2	Mätutrustning	26
5.3	Referensplats	27
5.4	Mätplats	28
5.5	Genomförande	32
5.6	Analys	35
5.7	Mätresultat	35
5.8	Slutsatser	36
6	Slutsatser	37
	Appendix	
A	Komplementerande figurer	39
	Referenser	43

1 Inledning

Taktiska mobila radionät som är oberoende av fast infrastruktur har en begränsad kapacitet på grund av flera faktorer, såsom avståndet mellan enheter, terräng, mobilitet och störskydds krav. I rapporten analyseras ett koncept som har potential att ge betydande kapacitetsökningar, med mer än en faktor tio, jämfört med dagens taktiska mobila radionät.

Det finns flera sätt att öka kapaciteten i ett radionät, till exempel genom att höja antennerna, vidga bandbredden eller utöka antalet antennelement. En ökad antennhöjd är inte möjligt på mobila enheter som ska röra sig i besvärlig terräng. I de frekvensband som normalt används, VHF och UHF, så är tillgänglig bandbredd en begränsad resurs. Högre frekvenser ger möjlighet till större bandbredd och därmed högre kapacitet, men för högre frekvenser begränsas räckvidden i hög grad av mellanliggande terräng och hinder och därmed ökar behovet av fri sikt mellan enheterna för att uppfylla räckviddskraven. Eftersom flygande relä farkoster ofta har fri sikt till varandra, så kan de användas till att öka kapaciteten i radionätet utan att det fragmenteras.

Utvecklingen av obemannade flygande farkoster, UAV:er, karaktäriseras av ökande prestanda och sjunkande pris, så autonoma UAV:er, som kan verka helt oberoende av operatörer på marken, kan snart var en realistisk komponent i till exempel en mekaniserad bataljon. Därför är ett lågflygande stödnät bestående av autonoma UAV:er ett intressant koncept för att väsentligt öka kommunikationskapaciteten i ett förband. Från UAV:n till marken kan avstånden hållas relativt korta, vilket förhoppningsvis ger en tillräckligt stark signal genom eventuell mellanliggande vegetation ner till markfordonet. För att i förlängningen kunna bedöma hur många UAV:er som behövs för tillräcklig robusthet och kapacitet, så analyserar vi därför vågutbredningen mellan markfordon i skogsterräng och UAV.

Rapporten består av två delar, där den första delen (kapitel 2 och 3) behandlar möjliga räckvidder i ett stödnät med autonoma UAV:er. I kapitel 2 beskrivs förutsättningarna för ett koncept med flygande relä farkoster. Möjliga positioner för en relä-UAV i förhållande till ett markfordon i skog beräknas i kapitel 3. Sedan följer rapportens andra del som behandlar vågutbredning i skog och redovisar nya mätresultat för länkdämpning genom skog för GHz-området. Kapitel 4 beskriver relevant teori för vågutbredning i skog. Kapitel 5 beskriver mätmetoden för skogsdämpning som användes; den är förhållandevis enkel och utnyttjar befintliga signaler från satellitnavigeringssystem. Slutligen sammanfattas resultaten i kapitel 6.

Vi vill särskilt tacka skogsägare Fredrik Hydén för att vi fick tillgång till mätplatsen samt kollegorna Peter Johansson, Mikael Alexandersson och Arne Lindblad för hjälpen med mätutrustning och mätmetodik.

2 Flygande stödnät

Vi undersöker förutsättningarna för ett koncept där vi antar att autonoma UAV:er automatiskt kan följa ett markförband på en lämplig höjd och position och bilda ett förbundet luftburet stöd-nät till vilket varje markfordon har förbindelse via någon UAV. Tanken är att kapaciteten ska vara betydligt högre än i de system som används idag, kanske en tiopotens högre. Ett luftburet stödnät kan använda högre frekvenser än dagens taktiska radionät eftersom länkarna mellan UAV:erna hamnar i fri sikt ovanför besvärlig terräng.

Två typer av radiolänkar behövs: (1) länkar mellan markfordon och UAV samt (2) länkar mellan UAV:erna i luften, se bild 2.1. Konceptet påminner om ett civilt basstationsnät, men här är basstationerna (UAV:erna) rörliga och cellerna kan i princip överlappa varandra om alla markfordon samlas på en liten yta, till exempel en parkeringsplats.

Man kan tänka sig att marknoderna enbart kommunicerar via UAV:erna, eller att de även bildar ett separat markbundet ad hoc-nät. Båda alternativen är tänkbara och ger olika konsekvenser vad gäller komplexitet och kapacitet. I rapporten fokuserar vi dock på UAV-stödnätet och i synnerhet på länken mellan UAV och markfordon, som vi tror är den mest kritiska delen för att konceptet ska kunna erbjuda väsentliga kapacitetsökningar.

När höga frekvenser används är det enklare att få plats med mer avancerade antenner på ett fordon eftersom antennstorleken blir mindre; avståndet mellan antennelementen bör vara i samma storleksordning som radiosignalens våglängd. Riktverkan och undertryckning av störande signaler kan då åstadkommas, vilket kan användas för att göra radionätet robust mot aktiv störning och svårare att upptäcka för signalspanare.

2.1 Länk mellan UAV och markfordon

Hur många marknoder som kan ha kontakt med en och samma UAV bestäms av markfordonens utspridning samt storleken på den yta inom vilken kommunikation med UAV:n är möjlig. Antal fordon per UAV påverkar också kapacitetsbehovet för länken mellan UAV och mark. Om många markfordon delar på kanalresurserna för en UAV så

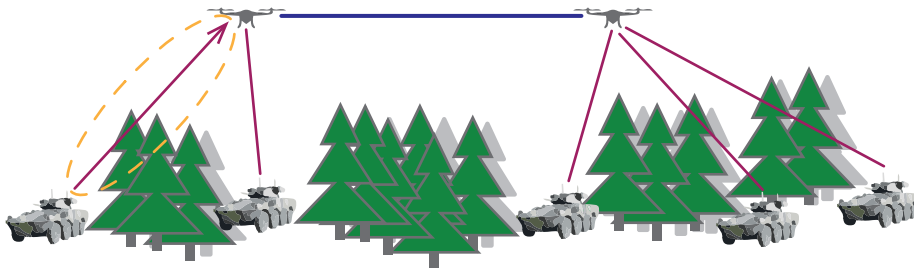


Bild 2.1: Flygande stödnät med autonoma UAV:er. Den mest kritiska delen för konceptet är länkarna med mellanliggande vegetation, till exempel den inringade länken i bilden.

krävs en högre länk-kapacitet än om ett fåtal markfordon gör det. En lagom avvägning kan vara att minst en pluton bör kunna nå samma UAV, kanske upp till att några få UAV:er behövs för ett kompani. Vi antar därför att det horisontella avståndet mellan en UAV och dess marknoder som högst bör vara ungefär en kilometer. Förmodligen har denna länk ett lägre kapacitetsbehov än länkarna mellan UAV:er eftersom en mindre andel av nätets trafik går över länken.

För det radiosystemexempel som beskrivs i senare i rapporten (kapitel 3) antar vi en önskad länkdatatakt på 10 Mbit/s. Vi antar också att tillgången till bandbredd är tillräcklig för att rymma signaler med en måttlig spektraleffektivitet, omkring 1 bit/s/Hz. Möjliga frekvensval begränsas alltså nedåt av krav på tillräcklig bandbredd, men även uppåt eftersom dämpningen i vegetation ökar med frekvensen. I vår undersökning väljer vi frekvenserna 1500, 2500 och 5000 MHz som exempel för utvärderingen. Frekvensvalet 1500 MHz motiveras också av de mätningar som redovisas senare i rapporten. Effektnivån för sändaren i UAV:n måste vara begränsad på grund av UAV:ns lastförmåga och bränsleförbrukning. Förstärkare med höga effekter blir tunga. Vi antar här att måttligt stora UAV:er används och att sändareffekten är 10 W. Det bör vara lämpligt att dynamiskt tidsdela access för länken mellan fordonen och UAV:n, eftersom modernas trafikbehov kan variera. Till exempel så kan ett fordon vara källa för strömmande media vid en tidpunkt och nerlänkens trafikbehov kan dominera vid en senare tidpunkt.

Olika UAV:er bör inte använda samma frekvenskanal till kommunikation med sina marknoder. Detta för att undvika att hela marknätet måste dela på samma resurs, vilket skulle kräva onödigt höga länkdatatakt. Av detta skäl är frekvensdelning lämpligt för att separera UAV:ernas mark-kommunikation. Å andra sidan kan det totalt sett krävas många frekvenskanaler om det behövs många UAV:er i nätet (få marknoder per UAV). Denna avvägning behöver undersökas mer i detalj med hänsyn till Försvarsmaktens frekvenstillgång, men det ligger utanför ramen för den här studien.

2.2 Länkar mellan UAV:erna

Eftersom det är fri sikt mellan UAV:erna så är här högre frekvensband användbara. Därmed är också större bandbredder och datatakt möjliga. Vi bedömer därför att länken mellan UAV:er inte är lika kritisk för konceptet som länken mellan UAV:er och marknoder, så därför analyseras inte vågutbredningen för luftlänkarna här. Nätet i luften kan utformas som ett mobilt ad hoc-nät, men länkarna i nätet är förhållandevis stabila och ändras inte så fort jämfört med länkarna i ett ad hoc-nät på marken. Däremot är interferenser i allmänhet starkare jämfört med mark-nät, när flera länkar används samtidigt. Därför kan man räkna med att den totalt tillgängliga kapaciteten är ungefär lika med länkdatatakten delat med antalet återsändningar som krävs för trafiken i nätet. För att hantera användartrafik, mobilitet och nätöverhead krävs en högre länk-kapacitet jämfört med länken mellan UAV:er och marknoder, beroende på trafikmönstret och utformningen av nätet. Kanske kan riktantenner ytterligare förbättra kapaciteten, men det är ett forskningsproblem i sig att utveckla protokoll för att hantera adaptiva riktantenner i mobila ad hoc-nät.

3 Analys av länken mellan markfordon och UAV

Täckningsytan på marken från varje UAV blir, om vi antar en plan terräng med homogen skog, en cirkelyta vars radie r bestäms av vilken största dämpning radiosystemet klarar av. Dämpningen beror, förutom på avståndet och använd radiofrekvens, av skogshöjden och vinkeln v , se bild 3.1. Vi analyserar vilka möjliga radier som skulle kunna åstadkommas för radiosystem vid frekvenserna 1500, 2500 och 5000 MHz. Antagandet om en plan terräng i denna analys motiveras av att dämpningen vid dessa frekvenser snabbt blir mycket stor om gångvägen mellan markfordon och UAV blockeras av terränghinder. För att bestämma relevanta känslighetströsklar definierar vi ett antal enkla radiosystemexempel under antagandet att länken ska stödja en informationsdataakt på 10 Mbit/s.

3.1 Radiosystemexempel

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

$$E_b = \frac{PG_m G_u}{LR}, \quad (3.1)$$

där G_m och G_u är markstationens respektive UAV:ns antennvinst, L är länkdämpningen mellan de två radiostationerna, och R är informationsdataakten. Utan avsiktlig eller oavsiktlig störning så kan mottagarbrusets spektraltäthet, med hjälp av mottagarens systembrusfaktor F , uttryckas som

$$N_0 = kT_0 F, \quad (3.2)$$

där $k \approx 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K är Boltzmans konstant och $T_0 = 290$ K är referenstemperaturen för brusfaktorn F . För att kommunikation över länken ska vara möjlig så måste signal-

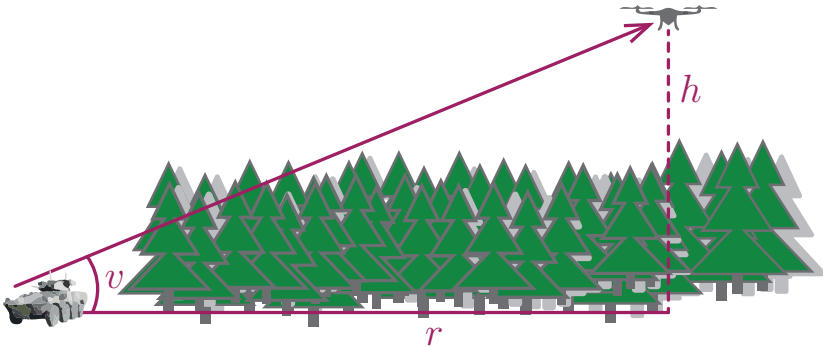


Bild 3.1: Analyserat scenario för länken mellan markfordon och UAV.

Tabell 3.1: Parametrar för exemplarsystem.

f [MHz]	R [Mbit/s]	P [dBm]	F [dB]	γ [dB]	G_m [dBi]	G_u [dBi]	M [dB]	L'' [dB]
1500	10	40	5	7	0	0	10	122
					7	0		129
2500					0	0		122
					11	0		133
5000					0	0		122
					17	0		139

till brusförhållandet (SNR) vara större än en tröskelnivå γ :

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{PG_mG_u}{kT_0FLR} > \gamma. \quad (3.3)$$

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 (3.3)

$$L < \frac{PG_mG_u}{kT_0FR\gamma} = L', \quad (3.4)$$

där L' betecknar den största möjliga länkdämpningen som uppfyller olikheten.

I våra systemexempel tittar vi på två alternativ när det gäller antenn på markfordonet, ett fall med en rundstrålande antenn och ett fall med en riktantenn som vi antar har samma apertur för de tre undersökta frekvenserna. Aperturen för antennen i systemexemplen motsvarar en cirkulär reflektor med en diameter på 20 cm och en aperturverkningsgrad på 50%. Antennen på UAV:n antas vara rundstrålande. Det senare antagandet är betingat av att vi i den här studien inte önskat göra några antaganden om storlek, eller övriga prestanda, för den flygande plattformen. Implicit görs dock antagandet är att den kan bära radiostationen och försörja den med energi för de antagna uteffekterna. Parametrarna för våra systemexempel för länken mellan markfordon och UAV 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

$$L'' = L' + M, \quad (3.5)$$

där L' beräknats från de övriga systemparametrarna med hjälp av (3.4) och M är en fädningsmarginal som antagits inkludera både storskalig och småskalig fädning.

3.2 Beräkning av länkdämpning

Vi har beräknat länkdämpningen för det länkszenario som visas i bild 3.1 för de tre frekvenser som anges för systemexemplen i tabell 3.1. Vi antar att markstationen befinner sig i skog, eller alldeles i anslutning till en skogskant för aktuell riktning mot UAV:n. Vidare antar vi att det, bortsett från skogen, råder fri sikt mellan markstationen och UAV:n. Fri sikt innebär för radioförbindelser att den första fresnelzonen är fri från

Tabell 3.2: Använda värden på de elektriska parametrarna för skog vid olika frekvenser.

Frekv. (MHz)	FOI: Gles skog		ITU: Tät skog	
	ϵ'	σ ($\mu\text{S/m}$)	ϵ'	σ ($\mu\text{S/m}$)
1500	1.0186	71	1.0357	156
2500	1.0326	116	1.0625	255
5000	1.0786	241	1.161	548

hinder. Fresnelzonerna beskrivs av rotationsellipsoider, med sändare och mottagare i respektive brännpunkt. Den första fresnelzonen definieras av en ellipsoid där sträckan från sändare till mottagare, via en punkt på ellipsoiden, har en extra gångväg på en halv våglängd i förhållande till den direkta vägen. Exempelvis blir radien på den första fresnelzonen, mitt på en 1 km sträcka, 7.1, 5.5 och 3.9 m för frekvenserna 1500, 2500 respektive 5000 MHz.

Länkdämpningen har beräknats med en vågutbredningsmodell som löser vågekvationen med hjälp av paraboliska ekvationer (PE). Modellen ger även möjlighet att beräkna länkdämpning i kuperad terräng, men i våra exempelberäkningar använder vi plan mark för att göra exemplen mera generiska och tydliga. Skogen beskrivs i PE-modellen som en homogen dielektrisk skiva med en tjocklek motsvarande skogshöjden, se kapitel 4. I våra beräkningar har vi antagit en skogshöjd på 20 m och en antennhöjd för markfordonet på 3 m. Vidare antas (av beräkningstekniska skäl) skogen börja 10 m från sändaren, dvs. sändaren står inte inne i skogen. Givet det låga antennhöjden (3 m), och den antagna skogshöjden, bedöms skillnaderna i dämpning jämfört med antenn placerad inne i skogen som relativt små.

I kapitel 4 beskrivs modelleringen av skogen som en dielektrisk skiva lite mer i detalj. Centralt är den dielektriska skivans (skogens) elektriska egenskaper, dvs. dess dielektricitetskonstant och konduktivitet (ledningsförmåga), där konduktiviteten är av avgörande betydelse för hur mycket signalen dämpas av skogen (högre värde högre dämpning). De värden som har använts för dielektricitetskonstanten (ϵ') och konduktiviteten (σ) visas i tabell 3.2. Värdena baseras på våra mätningar (avsnitt 5.7) och på [1]. Eftersom konduktiviteten är lägre för dessa mätningar benämner vi skogstyperna: *gles* och *tät* i FOI:s mätningar respektive i ITU-modellen.

Den beräknade transmissionsförlusten från vågutbredningsberäkningarna redovisas som funktion av avstånd och höjd i bilderna 3.2–3.7 för avstånd upp till 1 km och höjder upp till 100 m. Motsvarande bilder för avstånd upp till 5 km och höjder upp till 1000 m återfinns i appendix A. Bilderna används i nästa kapitel för att bedöma möjliga flyghöjder för exempelsystemen.

PE-modellen är bäst lämpad för beräkningar där utbredningen är koncentrerad till ett område relativt nära den horisontella riktningen. Utbredningsriktningarna från källan behöver därför av beräkningstekniska skäl begränsas i elevationsled, även om den verkliga källan är rundstrålande. I de här aktuella beräkningarna har källan viktats med en gaussisk funktion med en öppningsvinkel på $\pm 10^\circ$. Denna beräkningstekniska viktning medför att värdena ovanför linjen mellan origo och punkten ($h = 100$ m, $d = 500$ m) inte är tillförlitliga i bilderna 3.2–3.7.

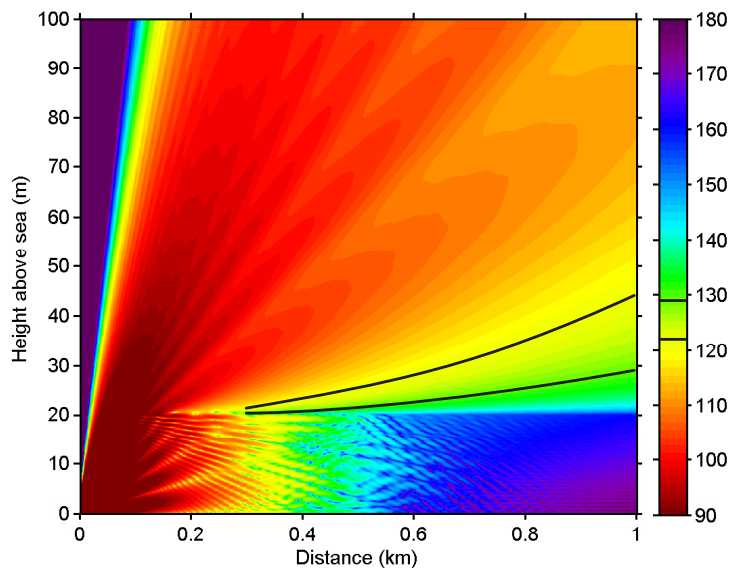


Bild 3.2: Transmissionsförlust längs en 1 km lång dielektrisk skogsskiva vid 1500 MHz. Sändarhöjden är 3 m. Värdena på de elektriska egenskaperna är för gles skog i tabell 3.2.

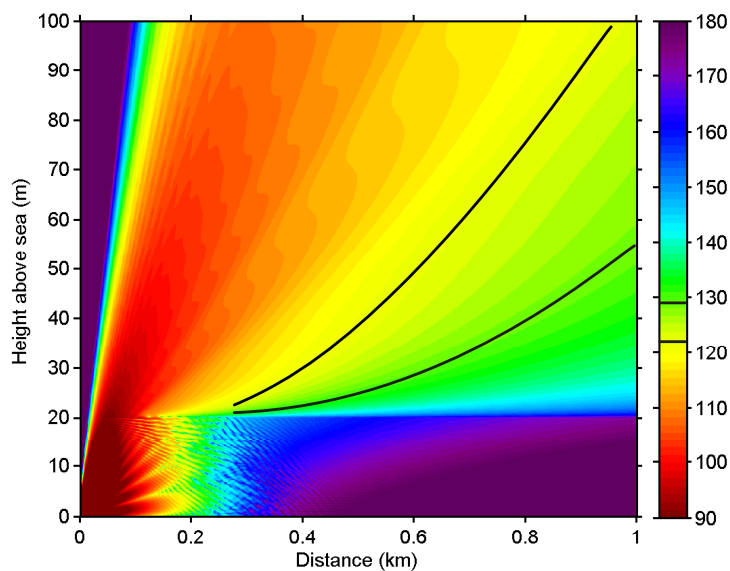


Bild 3.3: Transmissionsförlust längs en 1 km lång dielektrisk skogsskiva vid 1500 MHz. Sändarhöjden är 3 m. Värdena på de elektriska egenskaperna är för tät skog i tabell 3.2.

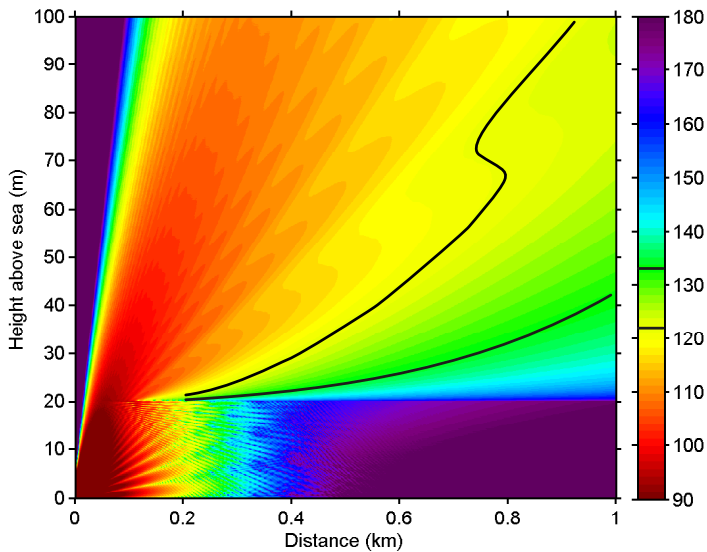


Bild 3.4: Transmissionsförlust längs en 1 km lång dielektrisk skogsskiva vid 2500 MHz. Sändarhöjden är 3 m. Värdena på de elektriska egenskaperna är för gles skog i tabell 3.2.

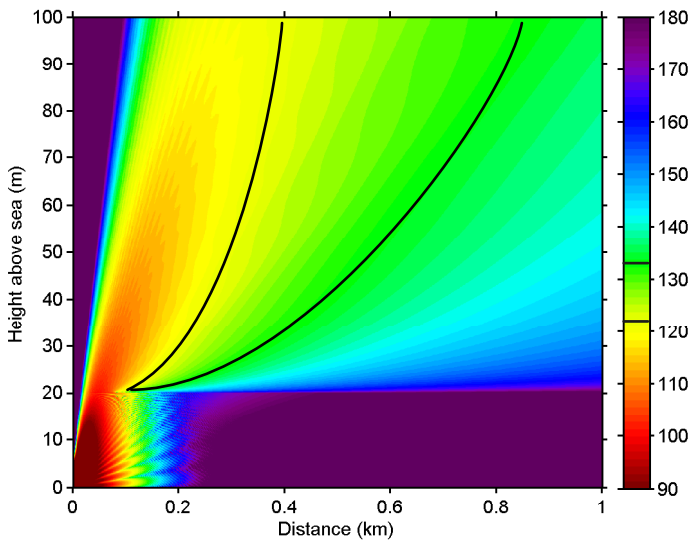


Bild 3.5: Transmissionsförlust längs en 1 km lång dielektrisk skogsskiva vid 2500 MHz. Sändarhöjden är 3 m. Värdena på de elektriska egenskaperna är för tät skog i tabell 3.2.

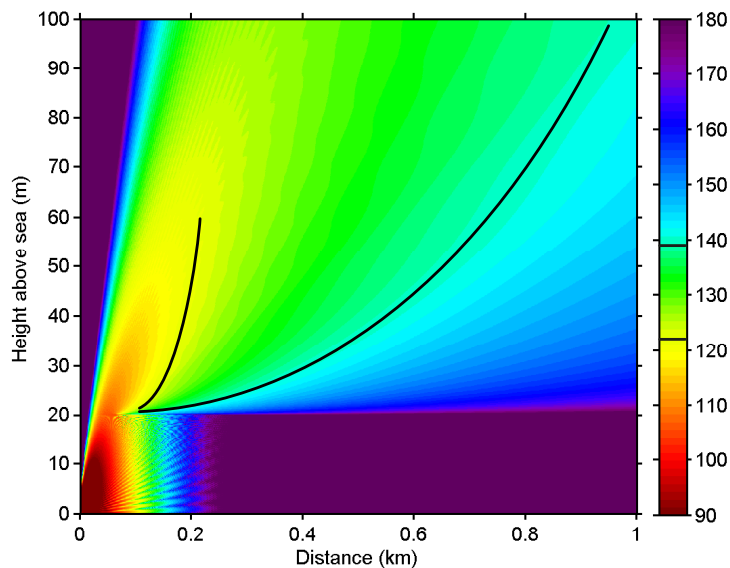


Bild 3.6: Transmissionsförlust längs en 1 km lång dielektrisk skogsskiva vid 5000 MHz. Sändarhöjden är 3 m. Värdena på de elektriska egenskaperna är för gles skog i tabell 3.2.

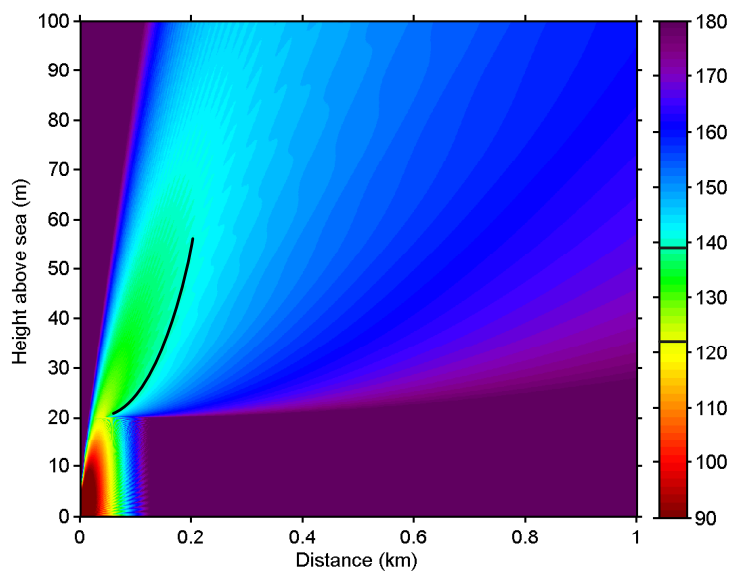


Bild 3.7: Transmissionsförlust längs en 1 km lång dielektrisk skogsskiva vid 5000 MHz. Sändarhöjden är 3 m. Värdena på de elektriska egenskaperna är för tät skog i tabell 3.2.

3.3 Räckvidder för olika flyghöjder

Baserat på beräkningarna av länkdämpning i föregående avsnitt studerar vi här sambandet mellan räckvidd och UAV:ns flyghöjd för de exempelsystem som diskuterats i avsnitt 3.1. I bilderna 3.2–3.7 är trösklarna (se tabell 3.1) för exempelsystemen markerade med svarta linjer. För våra två systemexempel vid 1500 MHz kan vi med hjälp av bild 3.2 (gles skog) och bild 3.3 (tät skog) konstatera att det vid 1 km avstånd i den glesa skogen krävs UAV-höjder på ungefär 40 och 30 m för systemet med rundstrålande antenn respektive riktantenn på markstationen. För den täta skogen blir motsvarande UAV-höjder strax över 100 och ungefär 55 m för respektive system.

För systemen vid 2500 MHz konstaterar vi från bild 3.4 (gles skog) att för 100 m flyghöjd uppnås en räckvidd på drygt 900 m för systemet med rundstrålande antenn. Från bild A.3 (se appendix s. 40) kan vi dock se att systemet når 1 km vid ca 120 m flyghöjd. För systemet med riktantenn uppnås en räckvidd på 1 km för 40 m flyghöjd i den glesa skogen. I den täta skogen får systemet med rundstrålande antenn, enligt bild 3.5, enbart en räckvidd av ca 400 m vid 100 m flyghöjd. I den här regionen av bilden kan vi dock inte dra några säkra slutsatser från PE-beräkningarna. Systemet med riktantenn har en bättre räckvidd, mellan 800 och 900 m vid 100 m flyghöjd.

För systemen vid 5000 MHz ger beräkningarna för gles skog, bild 3.6, inga säkra värden på räckvidden för systemet med rundstrålande antenn, men det ligger troligen under 400 m för en flyghöjd på 100 m. För systemet med riktantenn nås en räckvidd på 1 km för en flyghöjd på drygt 100 m. Resultatet från beräkningarna av dämpningen i den täta skogen vid 5000 MHz, bild 3.7, visar på mycket höga värden. Inga säkra värden på exempelsystemens räckvidder kan ges eftersom de ligger utanför beräkningens giltighetsområde. Vi kan dock konstatera att transmissionsförlusten ligger på ca 150 dB vid ett avstånd på 500 m och en flyghöjd på 100 m, dvs. 11 dB högre än tröskeln för exempelsystemet med riktantenn.

3.4 Slutsatser

Analysen av länken mellan markfordon och UAV i skogsmiljö visar på stora skillnader i länkdämpning beroende på frekvensband och skogstäthet. Den högsta analyserade frekvensen (5000 MHz) har så stor dämpning för de undersökta skogstätheterna att realiserbarheten för länken i detta frekvensområde får anses vara mycket begränsad. För den lägsta analyserade frekvensen (1500 MHz) fungerar de undersökta exempelsystemen utmärkt för den glesare skogen och når den önskade räckvidden på 1 km även för den tätare skogen, även om högre flyghöjder krävs för den senare skogen. För den mellanliggande frekvensen (2500 MHz) är det bara exempelsystemet med riktantenn som når 1 km, och för den tätare skogen behövs dessutom en flyghöjd på drygt 100 m. Vi ser att inverkan av skogen har stor påverkan på dämpningen.

4 Vågutbredning i skog

Dämpningen genom skog ökar snabbt med ökande bärfrekvens. För radiosystem på L-band (ca 1–2 GHz), eller högre frekvensband, blir skogsdämpningen snabbt gränsättande för vilka räckvidder som kan uppnås i skogsmiljö med antenner monterade på fordon. Radiosignalers dämpning vid utbredning genom vegetation har studerats under lång tid. Ett stort antal modeller, både empiriska och analytiska, har under årens lopp tagits fram. Ett av problemen med många av de empiriska modellerna är att de oftast enbart är relevanta för den specifika geometri och det utbredningsscenario som de bakomliggande mätningarna utförts för. De empiriska modellerna är attraktiva för många tillämpningar genom att de som regel har en låg beräkningskomplexitet. Ett exempel på en enkelt parameteriserbar empirisk modell står att finna i ITU-rekommendationen ITU-R P.833-9 [1, s.1–4]. Analytiska modeller är mera rigoröst fysikaliskt förankrade genom att de är baserade på lösningar till Maxwells ekvationer. Nackdelen med dessa modeller är att det i allmänhet endast är möjligt att formulera och lösa problemen för vissa specifika geometrier [2, 3]. För analytiska modeller är det vanligt att beskriva skogen som en plan homogen dielektrisk skiva (med förluster) liggande över marken. På så sätt bildas tre skikt när luften räknas in. Modellens komplexitet kan ökas genom att beskriva skogen med hjälp av fler skikt. En nackdel med denna modellbeskrivning är att den är svår att kombinera med diffraktionsmodeller för att ta hänsyn till terrängens topografi. Vidare är de dielektriska parametrarna för skogen svåra att bestämma direkt, eftersom det inte råder något enkelt samband mellan trädens elektriska egenskaper och de värden som behöver användas i modellen. Ofta måste det ske genom anpassning till uppmätta dämpningsegenskaper för aktuell skogstyp. Parametrarna är dessutom starkt frekvensberoende. En attraktiv metod, som ger möjlighet att kombinera modellering av skogs- och diffraktionseffekter, är att numerisk lösa vågutbredningsekvationen med hjälp av paraboliska ekvationer (PE) [4, 5, 6].

I det här kapitlet presenteras den empiriska ITU-modellen [1, s.1–4] lite närmare och vi studerar hur dess parametrar kan kopplas till de elektriska parametrarna för en modell baserad på en dielektrisk skiva. I kapitel 5 används dessa samband för att ur mätdata extrahera de relevanta elektriska parametrarna för att använda mätresultaten i en PE-modell.

4.1 ITU modellen

En enkel parameteriserbar modell för hur dämpningen beror på gångsträckan i skog kan man finna i [1, s.1–4]. Modellen är i grunden empiriskt framtagen men modellens avståndsberoende överensstämmer med det som erhålls för en modell som betraktar skogen som en dielektrisk skiva, dvs. modellen är i linje med Tamirs idé [2]. Modellen gäller för fallet att en av radioterminalerna står i skogen; det är dock oklart från [1] hur långt från skogskanten den andra terminalen får befinna sig. Enligt modellen kan den så kallade tillskottsdämpningen för en signal med en viss gångsträcka i skog skrivas som

$$A_v = A_m \left(1 - e^{-\gamma d / A_m} \right) \quad [\text{dB}], \quad (4.1)$$

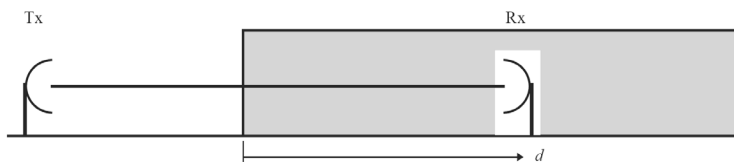


Bild 4.1: Illustration av vågutbredning i skog.

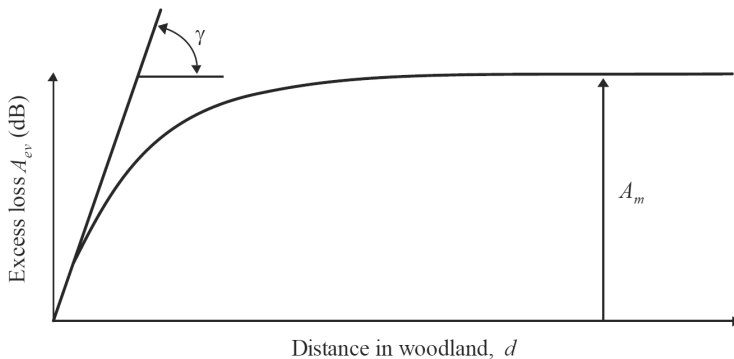


Bild 4.2: Tillskottsdämpning som funktion av gångvägen i skog.

där d är sträckan i skog, γ är den specifika dämpningen i dB/m för den aktuella skogen och A_m den maximala dämpningen, se bild 4.1. En kurva för tillskottsdämpningen i (4.1) ser schematiskt ut som i bild 4.2. Storheten A_m beror, förutom på antenn- och skogshöjd, även på frekvensen. Frekvensberoendet för A_m har formen

$$A_m = A_0 \left(\frac{f}{f_0} \right)^a \quad [\text{dB}], \quad (4.2)$$

där A_0 är dämpningen vid frekvensen f_0 och a är en konstant. Det använda värdet på konstanten är 0.42, som är taget från [1, sida 4]. När det gäller γ i (4.1), dvs. dämpningen, så har den också ett frekvensberoende. Dess frekvensberoende antar vi följer en rät linje som i [1, figur 2] med lutningen 1 i log- till log-skala. Detta räcker för att interpolera, eller extrapolera, A_m och γ från värden erhållna från mätningar vid specifika frekvenser till önskad aktuell frekvens.

4.2 PE-modellen

För att fånga upp effekterna av markens topografi, varierande ledningsförmåga och vegetation har vi använt den paraboliska ekvationsmodellen (PE-modellen) [4, 6]. Den är helt numerisk och därför ganska långsam för stora beräkningsområden. Skog modelleras som en dielektrisk skiva med tjocklek (höjd) som hämtas från en terrängtypsdatabas och ett komplexvärt brytningsindex, som ges av värdena på dielektricitetskonstanten

och konduktiviteten. Absolutbeloppet av det komplexa brytningsindexet är nära ett, med en mycket liten imaginär del eftersom konduktiviteten är liten. 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).

4.3 Transmission i skog beskriven som en dielektrisk skiva

Vi beskriver i det här avsnittet sambandet mellan skogens elektriska egenskaper och dämpningen av en våg som faller in mot gränsskiktet luft–skog med en viss infallsvinkel. Genom att bortse från markytans inverkan på utbredningen kan vi anta att skogen kan beskrivas som ett dielektrisk halvplan. Ur de härledda uttrycken kan skogens dielektriska parametrar beräknas (se även tabell 3.2).

4.3.1 Skogens elektriska parametrar

När skogen modelleras som ett icke förlustfritt dielektrikum kan dess komplexvärda relativa dielektricitetskonstant ϵ_r skrivas

$$\epsilon_r = \epsilon' + j\epsilon'', \quad (4.3)$$

där ϵ' är dess realdel och ϵ'' dess imaginärdel. Den imaginära enheten $j = \sqrt{-1}$. Imaginärdelen är för faskonventionen $e^{\omega t - kx}$

$$\epsilon'' = -\frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} = -\frac{\sigma}{\epsilon_0 2\pi f} = -\frac{\sigma \lambda_0}{\epsilon_0 2\pi c_0}, \quad (4.4)$$

där σ är konduktiviteten, ω vinkelfrekvensen, f frekvensen, ϵ_0 och c_0 är dielektricitetskonstanten, respektive ljushastigheten, för vakuum. Vidare betecknar λ_0 våglängden i vakuum. Genom att utnyttja sambandet

$$c_0^2 = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0},$$

där μ_0 är permeabiliteten för vakuum, i sista ledet av (4.4) får vi

$$\epsilon'' = -\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{\sigma \lambda_0}{2\pi} = -\frac{Z_0}{2\pi} \sigma \lambda_0 \approx -60 \sigma \lambda_0, \quad (4.5)$$

där Z_0 är vågimpedansen för vakuum, och där vi i approximationen i sista ledet utnyttjat att $Z_0 \approx 120\pi$. Ytterligare ett användbart sätt att uttrycka imaginärdelen av skogens brytningsindex, genom att använda sambandet $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ i (4.5), är

$$\epsilon'' = -\frac{Z_0}{k_0} \sigma. \quad (4.6)$$

4.3.2 Dämpning av intern plan våg

För en plan våg som utbreder sig i x-riktningen kan det elektriska fältet skrivas

$$E(x) = E_0 e^{(-jk_0 n_v x)} = E_0 e^{(-jk_0 \sqrt{\epsilon_r} x)} = E_0 e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} \quad (4.7)$$

där E_0 är en konstant, k_0 vågtalet i vakuum, n_v skogens brytningsindex, och där vi i andra likheten utnyttjat sambandet $n_v = \sqrt{\epsilon_r}$. I sista ledet har vi identifierat

$$\alpha = -k_0 \Im \{ \sqrt{\epsilon_r} \} \quad (4.8)$$

$$\beta = k_0 \Re \{ \sqrt{\epsilon_r} \}. \quad (4.9)$$

där α är radiovågens dämpning i neper per meter, och där β är vågens faskonstant i radianer per meter. $\Re\{\cdot\}$ och $\Im\{\cdot\}$ betecknar real-, respektive imaginärdel. Den specifika dämpningen γ , uttryckt i [dB/m] är relaterad till α enligt

$$\gamma = \frac{20}{\ln 10} \alpha \approx 8.6859 \alpha, \quad (4.10)$$

där $\ln(\cdot)$ betecknar den naturliga logaritmen.

4.3.3 Dämpning av externt infallande plan våg

När en plan våg med elevationsvinkeln θ faller in mot gränssytan mellan luft och vegetation kommer en del av vågen att reflekteras och en del att passera gränssytan och fortsätta ner genom vegetationen. Den senare komponenten kommer, genom att vegetationen utgör ett tätare medium, att brytas något i gränssytan och få en något större elevationsvinkel θ_v . Genom att absolutbeloppet av brytningsindex numeriskt ligger nära ett kommer bara en mycket liten del av den infallande vågens energi att reflekteras. Vi försummar därför, i den följande analysen, denna energiförlust och antar att den komponent som fortsätter ner genom vegetationen har samma styrka som den infallande vågen.

För analys av transmissionsdämpningen i den dielektriska skivan är det praktiskt att arbeta med den vertikala komponenten av vågtalet k_z i skivan. Denna komponent kan skrivas

$$k_z = \sqrt{k_v^2 - k_x^2}, \quad (4.11)$$

där k_v är vågtalet i den dielektriska skivan och k_x dess horisontella komponent. Från Maxwells ekvationer följer att de elektromagnetiska fältets tangentialkomponenter måste vara kontinuerliga i gränssytan mellan luft och vegetation. Det implicerar att det horisontella vågtalen också måste vara lika på både sidor av gränssytan, det vill säga

$$k_x = k_0 \cos \theta, \quad (4.12)$$

där vi antagit att brytningsindex, och därmed vågtalet, för luft är lika med det i vakuum. Genom att sätta in (4.12) i (4.11) och bryta ut k_0 får vi

$$k_z = k_0 \sqrt{n_v^2 - \cos^2 \theta}, \quad (4.13)$$

där n_v är vegetationens brytningsindex. Under vårt antagande att den infallande vågen från satelliten är plan, vilket är en god approximation om den är långt bort, kommer absolutbeloppet av fältstyrkan i skogen inte att bero på det horisontella positionen i skogen, utan enbart på avståndet från gränsytan mellan luft och vegetation. Däremot varierar det komplexa fältets fasvinkel (på grund av tidigare nämnda randvillkor) med den horisontella positionen. Det bör påpekas att vi i den här diskussionen ignorerar eventuella reflektioner i markytan. Det elektriska fältet inom den dielektriska skivan kan därför skrivas

$$E_v(x, z; \theta) = E_0(x; \theta) e^{-jk_z z}, \quad (4.14)$$

där z är det vertikala avståndet från gränsytan mellan luft och vegetation, och där $E_0(x; \theta)$ är fältet i luften vid gränsytan mellan luft och vegetation. Vi beskriver nu vegetationens inverkan på utbredningen med hjälp av överföringsfunktionen

$$f_v(z; \theta) = \frac{E_v(x, z; \theta)}{E_0(x; \theta)} = e^{-jk_z z} = e^{-j(k_0 \sqrt{n_v^2 - \cos^2 \theta}) z}, \quad (4.15)$$

där (4.13) utnyttjats i sista likheten. Om vi delar upp sista ledets exponent i (4.15) i en real- och imaginärdel får vi

$$f_v(z; \theta) = e^{k_0 \Im \{ \sqrt{n_v^2 - \cos^2 \theta} \} z} e^{-jk_0 \Re \{ \sqrt{n_v^2 - \cos^2 \theta} \} z} = e^{-\alpha_e z} e^{-j\beta_e z}, \quad (4.16)$$

där $\Re\{\cdot\}$ och $\Im\{\cdot\}$ betecknar real-, respektive imaginärdel, och där vi i sista ledet identifierat

$$\alpha_e = -k_0 \Im \left\{ \sqrt{n_v^2 - \cos^2 \theta} \right\} \quad (4.17)$$

$$\beta_e = k_0 \Re \left\{ \sqrt{n_v^2 - \cos^2 \theta} \right\}. \quad (4.18)$$

där α_e är radiovågens dämpning i neper per meter för det vertikala avståndet z från gränsytan, och där β_e är vågens faskonstant i radianer per meter.

Dämpningen genom skogen $A_v(z; \theta)$, uttryckt i [dB], erhåller vi som

$$A_v(z; \theta) = 20 \log_{10} |f_v(z; \theta)| = -\frac{20}{\ln 10} k_0 \Im \left\{ \sqrt{n_v^2 - \cos^2 \theta} \right\} z. \quad (4.19)$$

Dämpningen ökar för minskande värden på θ , och för $\theta = 0$ erhåller vi

$$A_m(z) = 20 \log_{10} |f_v(z; 0)| = -\frac{20}{\ln 10} k_0 \Im \left\{ \sqrt{n_v^2 - 1} \right\} z, \quad (4.20)$$

vilket för ett givet z motsvarar ITU-modellens A_m i (4.1) och (4.2).

4.3.4 Samband mellan dielektriska parametrar och dämpning

Givet att ϵ_r är känt kan vi beräkna γ från (4.8) och (4.10), samt A_m från (4.20). Inversen till problemet, dvs. att bestämma ϵ_r ur γ och A_m , saknar ett slutet uttryck i det allmänna fallet, varför problemet måste lösas numeriskt. Under vissa förhållande

kan dock approximationer göras som medför att inversen kan beräknas explicit. Om $\epsilon'' \ll \epsilon'$ och $\epsilon' \approx 1$ kan kvadratroten i (4.8) approximeras med hjälp av en Taylorutveckling och vi får

$$\alpha \approx -k_0 \frac{\epsilon''}{2}. \quad (4.21)$$

Genom att sätta in α från (4.21) i (4.10) och lösa ut ϵ'' erhåller vi det approximativa sambandet

$$\epsilon'' \approx \frac{\ln 10}{10 k_0} \gamma. \quad (4.22)$$

På motsvarande sätt kan vi Taylorutveckla kvadratroten i (4.20) om $\epsilon'' \ll \epsilon' - 1$, varvid vi erhåller det approximativa sambandet

$$\epsilon' \approx 1 + \left(\frac{\epsilon''}{2t} \right)^2, \quad (4.23)$$

där ϵ'' beräknats från (4.22) och

$$t = -\frac{\ln 10}{20} \frac{A_m(z)}{k_0 z}. \quad (4.24)$$

5 Mätning av skogsdämpning med hjälp av signaler från navigationssatelliter

På grund av den sparsamma tillgången på mätdata för dämpningen av radiosignaler i skog, framför allt inom det frekvensområde som är av intresse för radiolänken mellan markstation och UAV i denna studie, har olika möjligheter att genomföra mätningar studerats. Förutom traditionella mätmetoder, där både sändare och mottagare placeras i skog, har möjligheten att utnyttja befintliga satellitsignaler undersökts. En av fördelarna med att använda signaler från satelliter är att det ger en möjlighet att direkt mäta dämpningen genom skogen som funktion av elevationsvinkeln från markstationen. Mätmetoden kräver god kännedom om var den aktuella satelliten befinner sig. Vi har därför studerat möjligheten att använda signaler från navigeringssatelliter för detta ändamål. Yaschenko et al. redovisar i [7] preliminära resultat från ett försök att mäta transmissionsdämpningen i skog med hjälp av signaler från satellitnavigeringssystemet GLONASS. Författarna ger i [7] få kvantitativa resultat på skogsdämpningen från sina mätningar utan diskuterar i stället vilka effekter som en korrektion för skogens dämpning kan få i deras aktuella tillämpning, vilken är att bestämma markens fuktighet med hjälp av satellitbaserad radiometri i L-bandet (1575 MHz). Dock anger författarna att dämpningen för elevationsvinklarna 55° och 35° ligger i intervallen 6–10 dB, respektive 10–15 dB.

5.1 Mätmetod

Mätmetoden kan med stöd av bild 5.1 ganska väl sammanfattas i följande fem punkter:

1. En referensmottagare placeras på en öppen plats – fri horisont – inom ett avstånd från den aktuella mätplatsen som gör att riktningarna mot satelliterna kan betraktas som identiska för de två platserna.
2. En mätmottagare placeras i skogen vars dämpning ska bestämmas.
3. Registrera mottagarnas skattning av C/N_0 för varje synlig satellit.

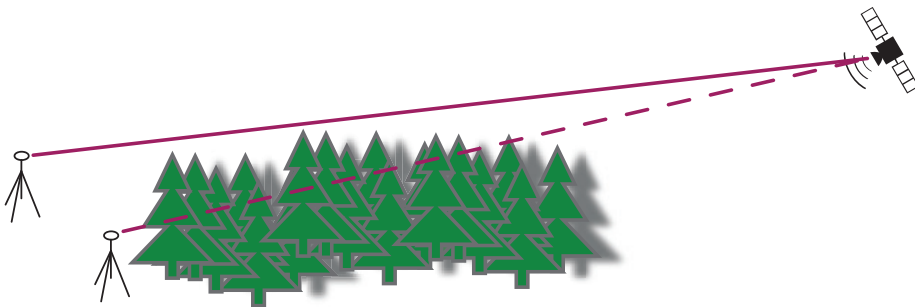


Bild 5.1: Mätmetod.

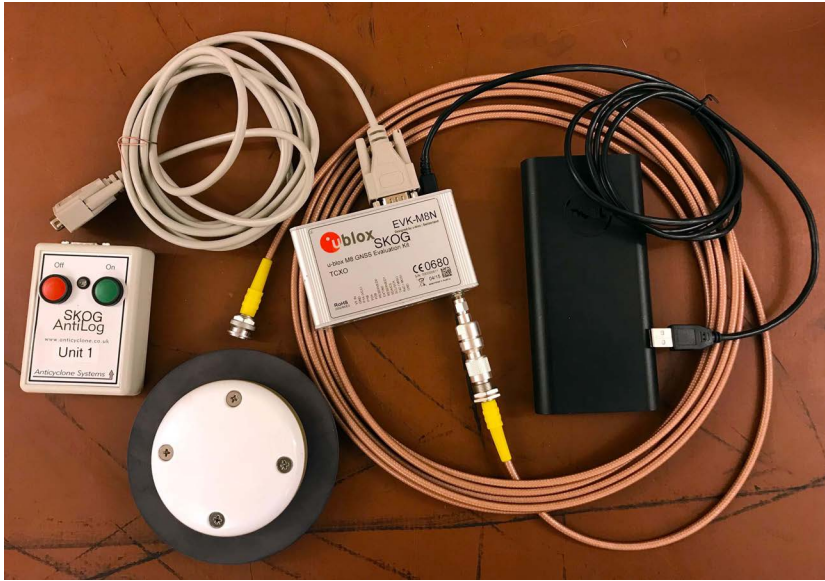


Bild 5.2: De komponenter som användes vid mätningen.

4. Beräkna skillnaden i C/N_0 mellan referensmottagaren och mottagaren i skogen för varje satellit.
5. Medelvärdesbilda resultatet för varje mätt elevationsvinkel.

Principen för mätningarna illustreras i bild 5.1.

5.2 Mätutrustning

Utrustningen för mätplatsen i skogen (se bild 5.2) bestod av följande komponenter:

- GNSS-mottagare: u-blox EVK-M8N [8]. Mottagaren skickar varje sekund information, i form av NMEA-meddelanden, via en serieport till en datalogger. Informationen innehåller bl.a. riktning (bäring och elevation) samt signalstyrka för samtliga mottagna GPS- och GLONASS-satelliter.
- Antenn: G5Ant-53AT1, Antcom Corporation [9]. Antennen har en diameter på 3.5" och är monterad på ett jordplan med en diameter på 5". Antennen är aktiv och har en inbyggd förstärkare på 33 dB med en brusfaktor på 3 dB.
- Datalogger: AntiLog, Anticyclone Systems Ltd [10]. I dataloggern lagras mottagna NMEA-meddelandena på ett minneskort för senare analys. Loggern strömförsörjs med ett internt 9V-batteri.
- Batteri: uppladdningsbart batteri för strömförsörjning av GNSS-mottagaren via USB-kontakt.



Bild 5.3: Mätutrustning uppställd på mätplatsen.

På fotot finns även kablagen för sammankoppling av de olika komponenterna med. Mätutrustningen för referensplatsen var identisk bortsett från att GNSS-mottagaren strömförsörjdes via en nätadapter från elnätet. Ett foto på mätutrustning uppställd på mätplatsen visas i bild 5.3. Antennen är här monterad på ett stativ på ca 1.25 meters höjd över marken och den övriga utrustningen är placerad i lådan på marken.

5.3 Referensplats

Referensplatsen för mätningarna var belägen på taket till en av FOI:s huskroppar i Linköping. Positionen på taket är fri från lokala hinder på huskropparna inom en bärringssektor på ca 10° – 200° . Relativt höga hus på större avstånd påverkar dock horisonten i



Bild 5.4: Vy från referensplatsen i bäring 111° med mottagarantennen i förgrunden.

östlig riktning (bäring ca 45°–110°), som framgår av fotot i bild 5.4. Horisontlinjen är som framgår av bilderna 5.5 och 5.6 något störd av en skogsridda i bäring 150–170°. För övrigt är terrängen i området runt referensplatsen relativt plan. Den största elevationsvinkeln från antennen är knappt 0.6° och härrör från ett område beläget ungefär 2–3 km söderut från referensplatsen. Elevationsvinkeln mot skogsriddan i bäring 150–170°, ca 200–300 m bort, uppskattas att uppgå till som mest 2–3°.

5.4 Mätplats

Platsen för mätningarna var belägen i Öjebro (ca 25 km väst Linköping). Försöksområdet framgår av flygfotot i bild 5.7, där det skogsområde som mätningarna utfördes i ramats in. Mottagarplatsen är markerad med symbolen *M* i fotot och siffrorna är referenser till platser där några av de fotografier som vi kommer att diskutera lite längre fram är tagna. Terrängen i området runt mätplatsen är mycket plan. Den största elevationsvinkeln från antennen är knappt 0.9° och härrör från ett litet område beläget ungefär 2 km rakt söderut från mätplatsen. Skogstypen kan beskrivas som välgallrad barrskog, med vissa inslag av lövträd (främst björk) inom delar av området. I bild 5.8 visas en sammansatt vy från mottagarplatsen i form av fyra foton tagna i olika riktningar inom den använda mätsektorn. Den första bilden i övre raden är tagen i ungefär östlig riktning från mätplatsen och sista bilden i nedre raden är tagen i ungefär sydlig riktning. Mellanliggande bilder är tagna för successiva vridningar från öster till söder. Den spetsiga änden på pinnen som ligger på mottagarantennen pekar åt öster. En vy rakt upp från mätantennen visas i bild 5.9. Från denna vy framgår att de högvuxna träden har ganska stora kronor och lite grenar på den nedre delen av stammen.

Vi visar i bild 5.10–5.13 ytterligare exempel på den aktuella skogsmiljön. Platser-



Bild 5.5: Vy från referensplatsen i bäring 148° med mottagarantennen i förgrunden.



Bild 5.6: Vy från referensplatsen i bäring 170° med mottagarantennen i förgrunden.

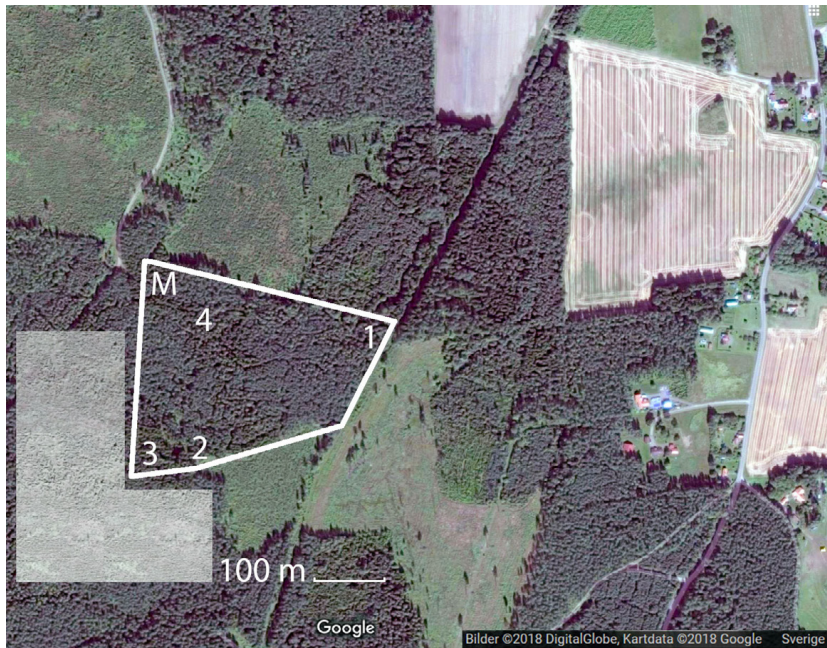


Bild 5.7: Mätplatsen (M) sett från ovan. Den vita linjemarkeringen visar det sammanhängande skogsområde som var av intresse för mätningen. I den ljusmarkerade ytan hade avverkning skett efter den tidpunkt då bilden togs. Foto ©2018 DigitalGlobe.



Bild 5.8: Skogen sett från mottagaren, i de riktningar som mättes.



Bild 5.9: Vy rakt upp vid mätplatsen.

na är markerade med siffrorna 1–4 i bild 5.7. Samtliga foton är tagna i riktning mot mottagarantennen från respektive plats.

5.5 Genomförande

Alla GPS-satelliter använder samma centerfrekvens på 1575.42 MHz och de olika satelliterna separeras genom att de använder olika kodningssekvenser. GLONASS-satelliterna använder alla en gemensam spridningskod och de olika satelliterna separeras i stället genom att de ligger på olika, men närliggande, frekvenskanaler centrerade kring 1607 MHz.

Mätningarna genomfördes under tiden 27–30 november 2018, med början klockan 11:24 UTC den 27 november och avslutades klockan 00:49 UTC den 30 november, under två sammanhängande tidsperioder med ett uppehåll på lite drygt en timma vid middagstid den 28 november.

Väderobservationerna under mätningarna är baserade på rapporter från Malmens flygplats, belägen ca 5 km väst referensplatsen och ca 15 km ost mätplatsen. Under den första mätperioden förekom ingen nederbörd. Temperaturen var vid starten av mätningen -4°C och var under eftermiddagen fallande, varvid den klockan 18:00 UTC nått -9°C . Temperaturen fortsatte att falla under kvällen och var under natten till den 28 november ca -13°C . Under förmiddagen steg temperaturen igen, för att vid den första mätperiodens slut nå -7°C . Vindhastigheten var under den första mätperioden 1–2 m/s. Under den andra mätperioden, vilken startade vid middagstid den 28 november, steg



Bild 5.10: Plats 1 (se bild 5.7).



Bild 5.11: Plats 2 (se bild 5.7).



Bild 5.12: Plats 3 (se bild 5.7).



Bild 5.13: Plats 4 (se bild 5.7).

temperaturen långsamt under det kommande dygnet från -7°C till $+1^{\circ}\text{C}$ vid 11:00 UTC den 30 november. Temperaturen låg därefter på $1\text{--}2^{\circ}\text{C}$ under den resterande delen av mätperioden. Från ungefär klockan 13:00 UTC den 29 november föll lätt regn, eller duggregn, fram till slutet på mätperioden. Vindhastigheten under den andra mätperioden steg under eftermiddagen den 28 november till 3 m/s vid 14:30 UTC och bibehöll denna nivå fram till 22:30 UTC, varefter vindhastigheten låg på ca 5–7 m/s fram till mätperiodens slut.

5.6 Analys

Första steget i bearbetningen av insamlat mätdata, från referens- respektive mätplats, var att skapa ett gemensamt tidssynkroniserat dataset. Mottagarna rapporterar information om mottagna satelliter varje sekund. Precisionen i tidshållningen är mycket hög genom att mottagarna får sin tidsinformation från GNSS-systemen. I nästa steg filtrerades data fram från den sektor i bäring ($110\text{--}180^{\circ}$) som var relevant för analysen av skogens dämpning. Bäringssektorn bestämdes utifrån de störningar av horisontlinjen som fanns på referensplatsen (se bild 5.4–5.6), samt skogens homogenitet och djup på mätplatsen (se bild 5.7). Därefter sorteras de mottagna satelliternas data, för varje tidssampel, in i en array med avseende på deras unika identitetsnummer. För de satelliter som är gemensamma, för båda mottagarna, beräknas dämpningen som förhållandet mellan rapporterat signal till brusförhållande C/N_0 i de två mottagarna. Slutligen beräknas dämpningen för varje elevationsvinkel (angiven som heltal) ut som det cykliska medelvärdet av de dämpningsvärden som beräknats per satellit och tidssampel.

5.7 Mätresultat

Huvudresultatet från analysen av satellitmätningarna visas i bild 5.14. De blå och röda kurvorna med ringar visar de dämpningsvärden som erhöles för olika elevationsvinklar för GPS- respektive GLONASS-satelliterna. I bilden visas också sex stycken tunna kurvor, utan ringar. Dessa kurvor visar dämpningar beräknade för skog med hjälp av ekvation (4.19) (se s. 23) för olika värden på modellparametrarna γ och A_m . Modellparametrarna har, för att kunna användas i (4.19), först beräknats om till brytningsindex n_v enligt beskrivningen i avsnitt 4.3.4. Den bästa anpassning till kurvorna från mätningarna fås för den heldragna svarta kurvan som motsvarar parametrarna: $\gamma = 0.12\text{ dB/m}$ och $A_m = 18\text{ dB}$. Om dessa parametrar räknas om till parametrar för en modell baserad på en dielektrisk skiva (se kapitel 4) får vi, för mätfrekvensen 1575 MHz, $\epsilon' = 1.0191$ och $\sigma = 73.3\text{ }\mu\text{S/m}$.

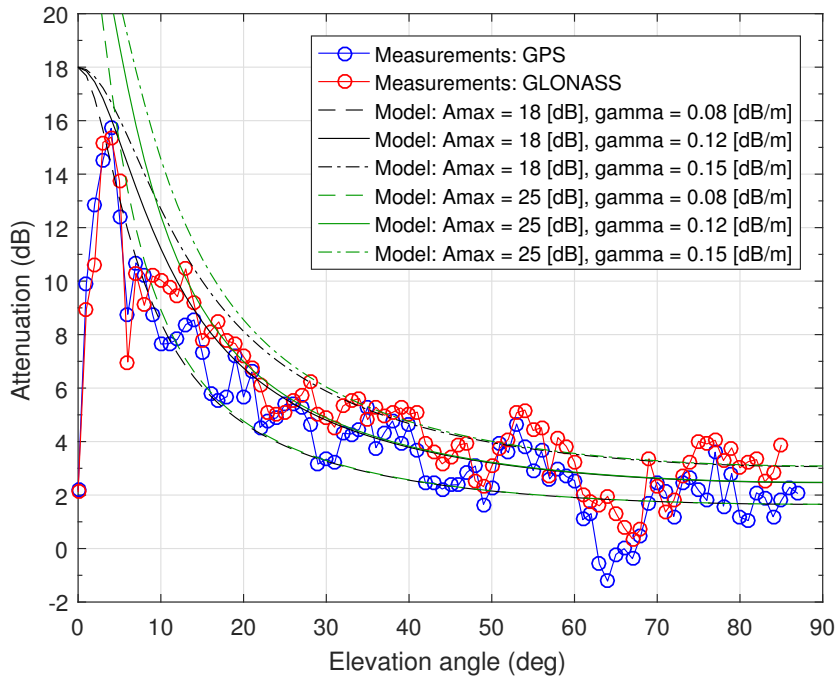


Bild 5.14: Dämpning som funktion av elevationsvinkel mot satelliterna. Mätresultaten för GPS och GLONASS är medelvärdesbildade över hela mätperioden. Kurvorna utan ringar är baserade på ITU-modellen.

5.8 Slutsatser

Mätresultaten från det skogsparti som vi undersökte ger lägre dämpningar än dämpningarna beräknade för skog med ITU-modellen. Detta innebär troligen att skogen som ITU-modellen baseras på var tätare. Sammanfattningsvis kan sägas att mer mätningar kan behövas för att få en tydligare uppfattning om dämpning i olika typer av skog. Den mätmetod, baserad på satellitsignaler, som vi har använt är enkel och kräver ingen dyr utrustning. Men för andra frekvenser måste mätningar göras på traditionellt sätt.

6 Slutsatser

Grundfrågeställningen för arbetet är om ett lågflygande stödnät bestående av autonoma UAV:er kan användas för att väsentligt öka kommunikationskapaciteten i ett förband. I en sådan tillämpning kan man anta fri sikt mellan UAV:erna men att länken mellan UAV och markfordon ibland dämpas av mellanliggande vegetation, varför vi bedömer denna länk som den mest kritiska för konceptet. För att i förlängningen kunna bedöma hur många UAV:er som behövs för tillräcklig robusthet och kapacitet har vi analyserat vågutbredningen mellan ett markfordon i skogsterräng och en UAV. Vi antar ett räckviddskrav på 1 km i horisontellt avstånd från en UAV för att täcka en normal utspridning av fordonen i en pluton. Vi analyserar frekvensintervallet 1.5–5 GHz eftersom bandbredden begränsar kapaciteten för lägre frekvenser och signalens dämpning i vegetation blir för stor ovanför detta intervall.

Eftersom kunskapen om vågutbredning i skog är begränsad i detta frekvensområde, genomfördes en mätning som redovisas i rapporten. Mätmetoden för skogsdämpning som användes är förhållandevis enkel och kan utföras med billig utrustning eftersom vi utnyttjar befintliga signaler på från satellitnavigeringssystem (vid 1575 MHz). Mätresultaten från det skogsparti som vi undersökte ger lägre dämpningar än de beräknade för en modell från ITU, varför vi kallar denna skogstyp gles och ITU-modellens skogstyp tät.

Analysen av länken mellan markfordon och UAV visar på stora skillnader i länkdämpning beroende på frekvensband och skogstäthet. Den högsta analyserade frekvensen, 5000 MHz, har så stor dämpning för de undersökta skogstyperna att realiserbarheten för länken i detta frekvensområde får anses mycket begränsad. För den lägsta analyserade frekvensen, 1500 MHz, fungerar de undersökta exemplarsystemen utmärkt för den glesa skogen och når den önskade räckvidden på 1 km även för den täta skogen, även om högre flyghöjder (ungefär 100 m) då krävs. För 2500 MHz behövs riktantenner för att nå 1 km, och för den tätare skogen krävs dessutom flyghöjder över 100 m. Sammantaget kan sägas att länken mellan markfordon och UAV är realiserbar upp till 1500–2500 MHz, beroende på utrymme för riktantenner och hur lågt man vill att UAV:erna ska flyga.

A Komplementerande figurer

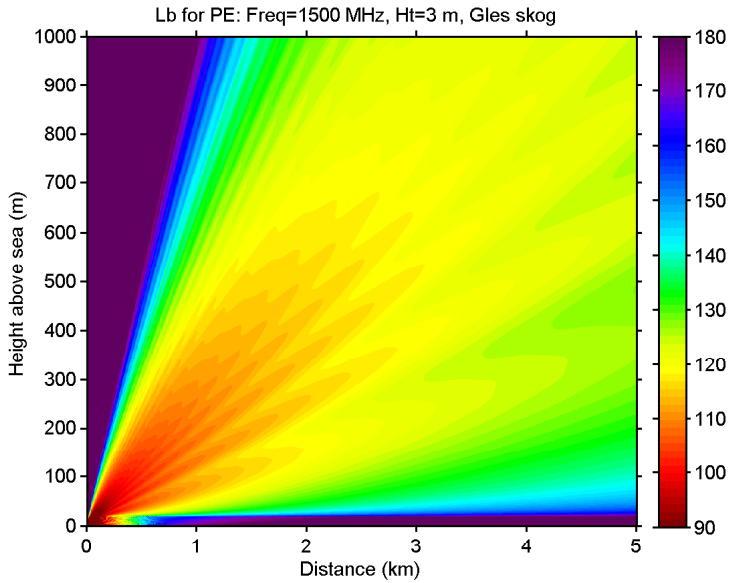


Bild A.1: Som i bild 3.2 men för en 5 km lång dielektrisk skogsskiva.

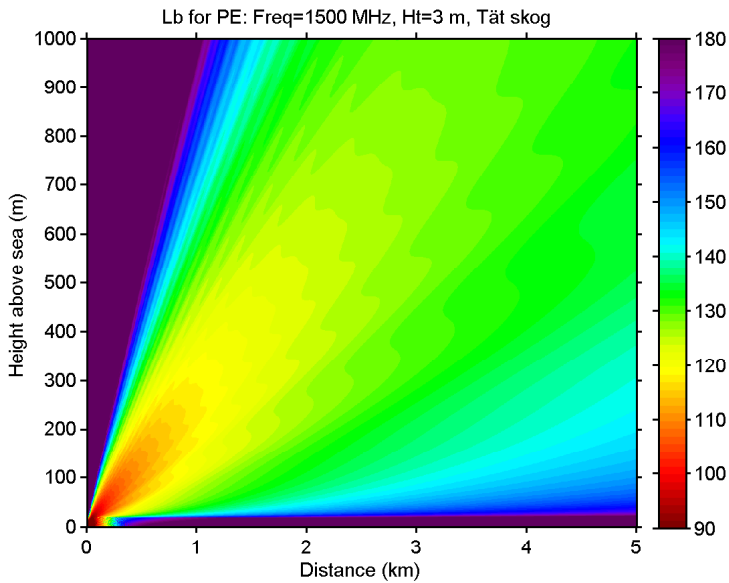


Bild A.2: Som i bild 3.3 men för en 5 km lång dielektrisk skogsskiva.

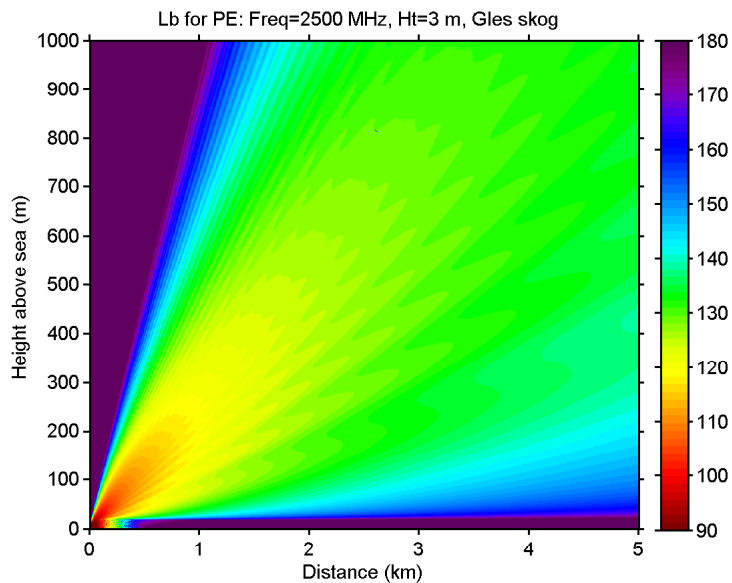


Bild A.3: Som i bild 3.4 men för en 5 km lång dielektrisk skogsskiva.

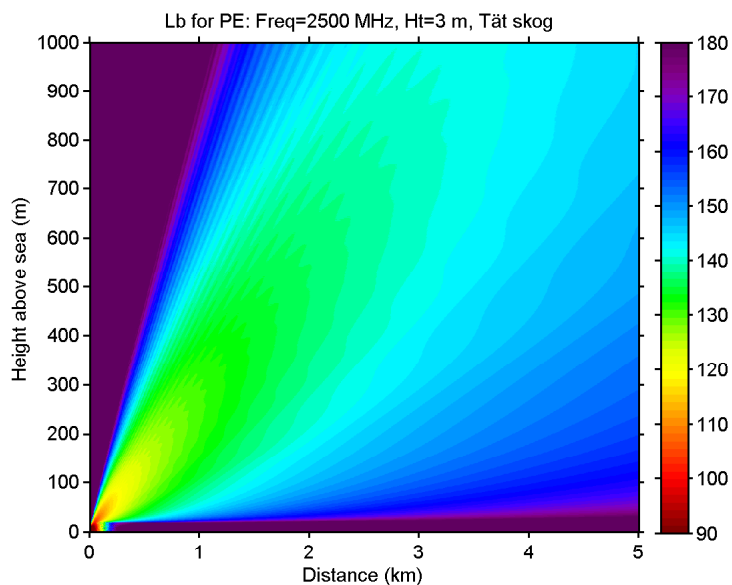


Bild A.4: Som i bild 3.5 men för en 5 km lång dielektrisk skogsskiva.

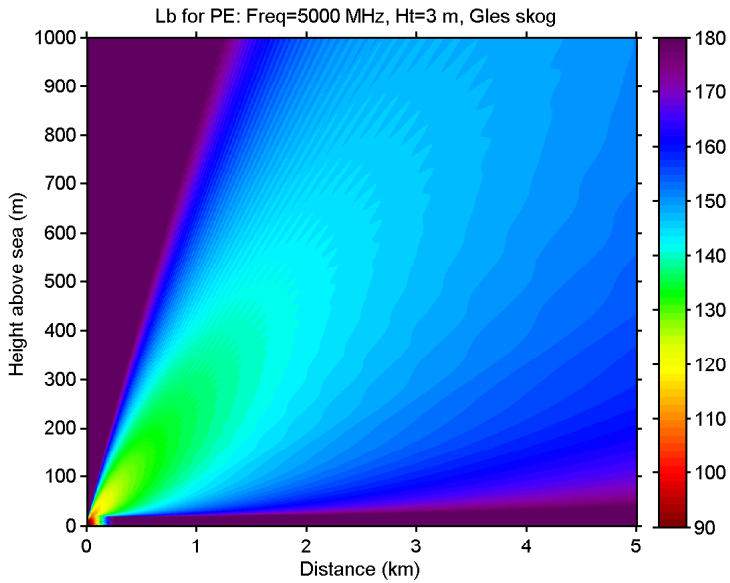


Bild A.5: Som i bild 3.6 men för en 5 km lång dielektrisk skogsskiva.

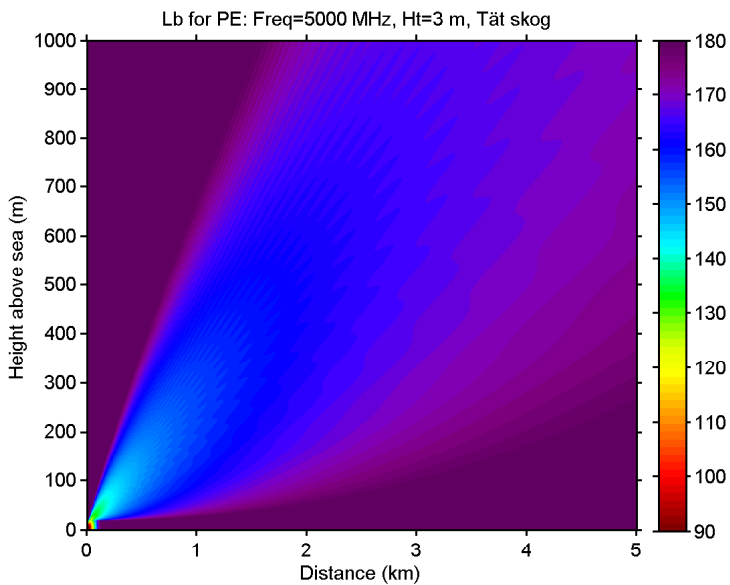


Bild A.6: Som i bild 3.7 men för en 5 km lång dielektrisk skogsskiva.

Referenser

- [1] ITU. Attenuation in vegetation. Recommendation ITU-R P.833-9, Sept. 2016.
- [2] T. Tamir. On radio wave propagation in forest environments. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 15(6):806–817, Nov. 1967.
- [3] D. Dence and T. Tamir. Radio loss of lateral waves in forest environments. *Radio Sci.*, 4(4):307–318, April 1969.
- [4] M. Levy. *Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation*. IEE Electromagnetic Waves Series 45. IEE, London, UK, 2000.
- [5] 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.
- [6] 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, Oct. 2007.
- [7] A. S. Yashchenko, P. P. Babrov, and V. L. Mironov. The use of navigational satellites signals for measurement the absorbance of the forest canopy. In *Progress In Electromagnetics Research Symposium—Spring (PIERS)*, pages 1227–1231, Lisbon, Portugal, May 2017.
- [8] u-blox AG. EVK-8/EVK-M8: u-blox 8/M8 concurrent GNSS evaluation kits. <https://www.u-blox.com/en/product/evk-8evk-m8> (hämtad 2019-01-09).
- [9] Antcom Corp. Antom's G5 Antenna. <https://primegps.fr/images/products/files/G5Ant-53A4T1.pdf> (hämtad 2019-01-08).
- [10] Anticyclone Systems Ltd. AntiLog RS232 Serial Data Logger. http://www.anticyclone.myzen.co.uk/product_antilog.html (hämtad 2019-01-07).

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