



## FOI MEMO

Projekt/Project  
60 GHz för militära tillämpningar

Sidnr/Page no  
1 (9)

Projektnummer/Project no Uppdragsgivare/Client  
A50010 FOI

FoT-område  
Inget FoT-område

Författare/Author  
Kia Wiklundh, Aleksander Blagoiev, Gunnar  
Eriksson, Karina Fors, Anders Hansson

Datum/Date Memo nummer/Number  
2025-12-16 FOI Memo 9145

### **60 GHz-kommunikation i militära tillämpningar**

Titel/Title  
60 GHz-kommunikation i militära tillämpningarMemo nummer/Number  
FOI Memo 9145

# 1 Sammanfattning

Frekvensbandet runt 60 GHz erbjuder mycket höga datahastigheter över korta avstånd. Det korta kommunikationsavståndet är ett resultat av den betydande syreabsorptionen som är karaktäristisk för transmission på frekvenser runt 60 GHz. Syreabsorptionen ger samtidigt ett bra skydd mot signalspaning, vilket annars är en förmåga som med traditionell radioteknik är svårt att uppnå. 60 GHz-kommunikation har studerats tidigare både på FOI och av internationella forskargrupper, men det är först de senaste åren som komponenter och radiolösningar finns tillgängliga på marknaden för civilt bruk.

Syftet med arbetet är att undersöka om kommunikation på 60 GHz är lämplig att användas för militära tillämpningar, där låg upptäcktsrisk kombinerat med hög datahastighet är viktiga förmågor som är svåra att realisera med annan radioteknik.

Tekniken är i första hand lämplig som ersättning för fiber i tillämpningar där det behövs höga datatakt (i storleksordningen Gbit/s) och där avstånden är korta (upp till 1,5 km vid direktsikt mellan noderna). Exempel på möjliga tillämpningar är kommunikation inom ledningsplatser och nästen. En annan möjlig tillämpning är för överföring av sensorinformation från UAV:er till en markstation eller mellan UAV:er. Det kan också vara möjligt att använda tekniken för kortare avstånd i skogsterräng. Mätningar gjorda med kommersiella radioutrustningar har visat att det är möjligt att uppnå i storleksordningen ett par hundra meter i gles granskog utan lägre grenar. Det finns dock fortfarande stora behov av mer kunskap om vågutbredning i skogsmiljö innan det går att avgöra om 60 GHz-kommunikation kan användas i militära tillämpningar i skog. Det är även viktigt att bedöma störtålighet för befintliga civila standarder som används i tillgängliga produkter och eventuellt kommande militära system.

# 2 Inledning

Frekvensbandet runt 60 GHz kännetecknas av hög länkdämpning samtidigt som det finns en stor tillgång till bandbredd. Detta innebär att det är möjligt att uppnå mycket höga datahastigheter men kommunikationsavstånden blir relativt korta. Längst kommunikationsavstånd erhålls då det är fri sikt mellan sändare och mottagare. Den höga länkdämpningen på grund av syreabsorption kan samtidigt nyttjas som skydd mot signalspaning. En låg upptäcktsrisk är värdefull i vissa militära användningsfall och egenskapen har visat sig vara viktig i kriget i Ukraina [1].

Kommunikation vid 60 GHz har undersökts tidigare på FOI och av internationella forskargrupper, men det stora hindret har varit bristen på radiohårdvara. Mätningar av 60 GHz-kanalen rapporteras i [2] och [3] och systemlösningar föreslås i [4]. De senaste tio åren har ett starkt kommersiellt intresse uppstått för radioteknik som använder 60 GHz-bandet och både komponenter och färdiga systemlösningar har introducerats på marknaden. Det är speciellt WiFi- och bilradarteknologi som har anpassats för kommunikationssystem på 60 GHz.

Enligt pressmeddelanden som nyligen publicerats tillkännager militära styrkor och produktleverantörer initiativ och försök med radioteknologi för 60 GHz. Till exempel undersöker den amerikanska armén möjligheten att använda WiGig för höga datahastigheter och militär kommunikation [5].

Syftet med arbetet i detta projekt är att undersöka om kommunikation på 60 GHz kan användas i militära tillämpningar för att skapa nya viktiga kommunikationsförmågor, som låg risk för upptäckt och avlyssning och samtidigt erbjuda mycket hög datatakt.

Titel/Title  
60 GHz-kommunikation i militära tillämpningar

Memo nummer/Number  
FOI Memo 9145

I detta memo sammanfattas arbetet som genomförts under 2024 och 2025 inom det anslagsfinansierade projektet *60 GHz för militära tillämpningar*. Under 2024 genomfördes en kartläggning av standarder och tillgängliga produkter, identifiering av möjliga användningsfall, teoretiska beräkningar av möjliga kommunikationsavstånd och analys av möjligheten till reflektion och diffraktion för radiosignalen. Mer information om arbetet finns dokumenterat i en FOI-rapport [6] och i ett konferensbidrag [7].

Under 2025 har upptäcktsavstånd till en signalspanare beräknats och mätningar har genomförts i skogsmiljö med kommersiella 60 GHz-produkter. Mätningar har även genomförts för några situationer med direktsikt mellan sändare och mottagare. Projektet planerar att skicka in ett konferensbidrag baserat på årets resultat.

### 3 Möjligheter och begränsningar med kommunikation på 60 GHz

Kommunikation på 60 GHz-bandet har många fördelar.

- I frekvensbandet runt 60 GHz finns olicensierade frekvensband, vilket medger flexibel frekvensanvändning jämfört med licensierade band.
- Den höga dämpningen förenklar eller fordrar ingen geografisk frekvensplanering.
- Kommunikation på frekvensbandet ger en låg sannolikhet för avlyssning (LPI) och låg sannolikhet för upptäckt (LPD), som en följd av betydande dämpning.
- Den korta våglängden stödjer möjligheten att använda gruppantenner och multiple-input multiple-out (MIMO)-teknik, som kan skapa hög antennvinst och smala antennlobber, vilket ökar LPI- och LPD-egenskaperna.
- Den höga dämpningen resulterar i låg risk för störningar från andra sändare och omgivande störningskällor.
- Frekvensbandets allokerade kanaler ger mycket höga datahastigheter, på grund av en stor kontinuerlig bandbredd (57-66 GHz i Europa och 57-71 GHz i Sverige).
- Det finns relativt mogen teknik, standardiserade protokoll och tillgängliga kommersiella produkter.
- Tekniken medger snabbare etablering i fält jämfört med att dra kablar och fiber.

Den höga syredämpningen kring 60 GHz resulterar i korta kommunikationsavstånd jämfört med vad som skulle vara uppnåeligt vid lägre eller högre frekvensband. Kommersiella system uppges ha ett kommunikationsavstånd på runt 1 km i scenarier med fri sikt mellan sändare och mottagare. I scenarier med vegetation eller hinder mellan sändare och mottagare är kommunikationsavståndet avsevärt kortare.

#### 3.1 Radiostandarder, frekvensband och regelverk

Det finns flera standarder för radioteknik anpassade för 60 GHz. De två mest kända standarderna, IEEE 802.11ad och IEEE 802.11ay [8, 9], är utvecklade enbart för 60 GHz-bandet och går under namnet WiGig och directional multigigabit (DMG). Syftet med standarderna har varit att möta krav på högre dataakt.

60 GHz-bandet är definierat som ett industriellt, vetenskapligt och medicinskt (ISM) band för olicensierad användning. Det betyder att bandet kan användas fritt under förutsättning att systemen uppfyller vissa regler. Bandet regleras olika i de olika frekvensregioner och sträcker sig från 57 GHz och uppåt med kanaler som är 2,16 GHz. I Sverige är bandet 57-71 GHz allokerat för olicensierad användning för dataöverföring [10]. Standarden 802.11ad använder en kanal, medan 802.11ay-standarderna har mekanismer för att lägga ihop flera kanaler. I Sverige är maximalt tillåten isotropisk

Titel/Title  
60 GHz-kommunikation i militära tillämpningar

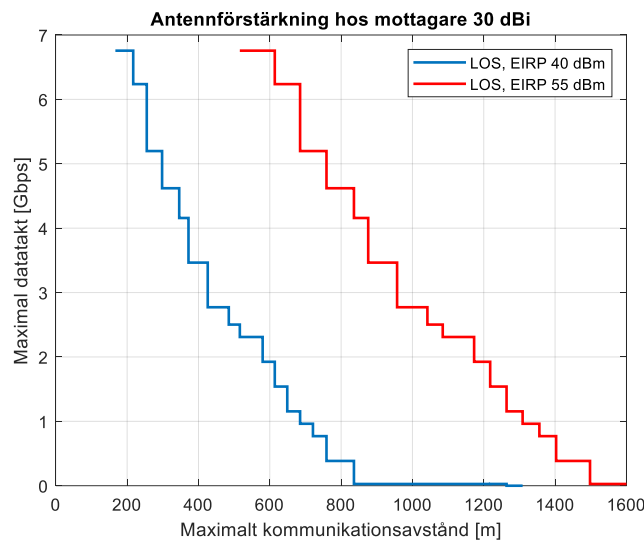
Memo nummer/Number  
FOI Memo 9145

utstrålad effekt (EIRP) 40 dBm i normala fall, men tillåts uppgå till 55 dBm för fasta utomhusinstallationer [10, 11].

## 3.2 Möjliga kommunikationsavstånd och datatakter

Möjliga kommunikationsavstånd beror bland annat på om det är direktsikt mellan sändare och mottagare eller om det finns hinder emellan. I beräkningar för ett kommunikationssystem som uppfyller standarden IEEE 802.11ad kan kommunikationsavstånd i miljöer med direktsikt bli upp mot 850 m respektive 1,5 km beroende på om EIRP 40 dBm eller 55 dBm används, se Figur 1, [6,7]. I beräkningarna antas att antennförstärkningen hos mottagaren är 30 dBi. Eftersom IEEE 802.11ad är ett adaptivt system som ger högre datatakt om den mottagna effekten är hög blir kommunikationsavstånden kortare om datatakten ska maximeras.

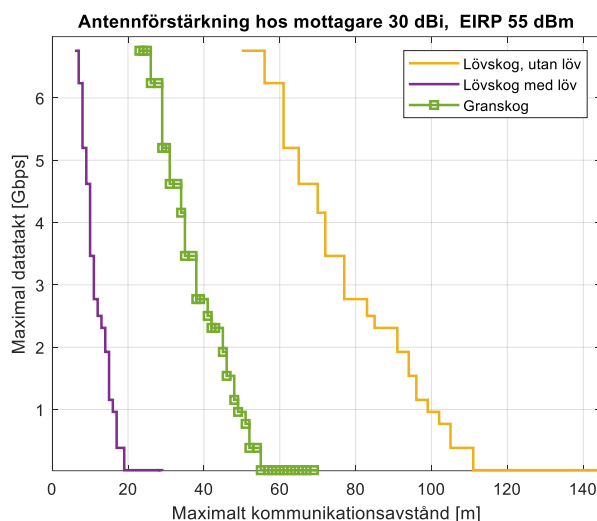
Om kommunikationen istället sker i skogsmiljö blir de kommunikationsavstånden avsevärt kortare. I [6] presenteras vågutbredningsmodeller för lövskog och granskog. Baserat på dessa modeller kan möjliga kommunikationsavstånd beräknas, se Figur 2. Det längsta kommunikationsavståndet är i lövskog utan löv med ett maximalt avstånd på 110 meter, vilket kan jämföras med 1,5 km vid direktsikt. Det är värt att nämna att kanalmodellerna som finns för skogsmiljöer är bristfälliga och baseras på ett begränsat underlag i form av några få mätningar. För att kunna avgöra om 60 GHz-kommunikation lämpar sig i militära tillämpningar i skogsmiljö är det därför viktigt med mer kunskap om vågutbredning i sådana miljöer.



Figur 1 Maximalt kommunikationsavstånd för olika datatakter baserat på standarden IEEE 802.11ad med olika antaganden om EIRP [6, 7].

Titel/Title  
60 GHz-kommunikation i militära tillämpningar

Memo nummer/Number  
FOI Memo 9145



Figur 2 Maximalt kommunikationsavstånd för olika datafaktorer baserat på standarden IEEE 802.11ad med EIRP 55 dBm, i olika typer av skog [6, 7].

### 3.3 Upptäcktsavstånd

Att undgå upptäckt från en signalspanare är en viktig egenskap i många militära scenarier. I Tabell 1 redovisas upptäcktsavstånd av en 60 GHz-sändare för några olika antaganden. Om kommunikationssystemet antas använda EIRP 55 dBm blir det maximala upptäcktsavståndet ca 2 km om signalspanaren antas behöva ett signal-brus-förhållande (SNR) på 10 dB. Beräkningarna baseras på ett värsta fall där sändande nod antas vara riktad mot signalspanaren utan några hinder i vägen, och där signalspanaren antas ha en mottagare med känslighetsnivån -69,7 dBm (över bandbredden 2,16 GHz) och en aktiv antenn med brusfaktor 3,2 dB, förstärkning 24 dB och en antennvinst på 42 dBi. Dessutom antas två olika värden för eventuell kabelförlust [12]. Denna information används sedan för att beräkna känslighetsnivån för hela systemet. För den högsta utsända effekten (55 dBm) blir de beräknade upptäcktsavstånden ca 2-2,5 km och för den lägre effekten blir avstånden mellan 1 och 2 km.

Standarden IEEE 802.11ad har en inledande fas där antensystemen hos de olika noderna riktas in mot varandra. I det förfarandet sänder noden åt många olika håll, vilket inte är optimalt när det gäller risk för upptäckt. Den typen av mekanismer bör analyseras vidare och eventuellt förändras om systemet ska användas militärt.

Tabell 1 Beräknade upptäcktsavstånd för ett fri-siktsscenario med olika antaganden.

Kabelförlust [dB]	SNR-krav [dB]	Känslighetsnivå [dBm]	Upptäcktsavstånd [m]	
			Max EIRP 40 dBm	Max EIRP 55 dBm
0	0	-77,4	1760	2550
11,8	0	-76,2	1700	2490
0	10	-67,4	1280	2020
11,8	10	-66,2	1230	1960

Titel/Title  
60 GHz-kommunikation i militära tillämpningar

Memo nummer/Number  
FOI Memo 9145

## 4 Möjliga militära tillämpningar

Utvecklingen av kommersiell hårdvara för 60 GHz-system går snabbt. De kommersiella systemen är utvecklade främst för inomhusmiljöer och urbana miljöer, där det antas fri sikt och korta avstånd mellan sändare och mottagare. Sådana användningsfall finns militärt, men med en ökad kunskap om systemets prestanda i andra typer av miljöer skulle användningsfallen eventuellt kunna utökas.

En översikt av möjliga militära tillämpningar av 60 GHz-kommunikation presenteras i [13] av en forskargrupp. De föreslagna tillämpningarna är trådlösa lokala nätverk för taktiska ledningsplatser och fälthögkvarter, backhaul-länkar med hög datatakt från ett lokalt radionät till ett kärnnät och som kommunikationslösning för nätverksuppkopplade robotar och robotsvärmar. Gemensamt för de föreslagna tillämpningarna är att de kräver höga datatakt och har direktsikt mellan noderna.

I detta projekt gjordes inledningsvis en inventering av möjliga användningsfall som bland annat utgick från en beskrivning av stabsplatser för brigad och bataljon [14]. Brigaden har vanligtvis tre ledningsplatser (L1, L2 och L3), där brigadchefen och ställföreträdande brigadchef är placerad vid L1 och L2. L1 och L2 kännetecknas av hög mobilitet och terrängframkomlighet med hjälp av stridsfordon 90. De olika enheterna inom L1 respektive L2 är vid gruppering sammankopplade med fiberkabel mellan enheterna (under 50 meter). Brigadens stabsplats L3 grupperar typiskt i brigadens bakre område i s.k. nästen, som ofta ligger dolda i skogsterräng max 500 meter ifrån varandra. Även sambandet mellan nästena inom L3 utgörs av fiberkommunikation för att minska emittering och upptäcktsrisk. Fiberkommunikation används även som transmission mellan fordon och tält inom de olika nästena (tiotals meter). 60 GHz-kommunikation kan vara en möjlig teknik som ersättning för kablar eller fibrer för att snabba upp (om)grupperingen inom de främre ledningsplatserna L1 och L2 och inom nästen i L3. Kommunikation mellan nästen (~500 m) kan fungera beroende på mellanliggande terräng, men förmodligen kräves upphöjda antenner för att erhålla direktsikt.

Andra möjliga användningsfall är situationer där stora mängder information behöver överföras mellan enheter placerade relativt nära varandra. Sådan informationsöverföring sker idag vanligtvis antingen via fasta radiolänkar, fiberanslutningar eller genom överföring med hjälp av USB-minnen. En typisk situation för dataöverföring är när databaser (geodata eller C2-information) behöver synkroniseras och uppdateras mellan exempelvis fordon. Ett annat scenario är dataöverföring av nyttolast mellan obemannade flygfarkoster (UAV) och mellan en UAV och en markstation. Nyttolasten består av en stor mängd data, t.ex. sensordata, som behöver överföras från en UAV till en markstation och kommunikationen sker ofta på någon kilometers avstånd med direktsikt. En 60 GHz-lösning skulle potentiellt kunna användas för backhaul-kommunikation. Denna tillämpning är ett av användningsfallen i den kommersiella utvecklingen [15]. Den önskade räckvidden är förmodligen flera kilometer, vilket kan vara svårt att uppnå, men kan vara möjligt med hjälp av relänoder.

Sammanfattningsvis har följande militära användningsfall identifierats:

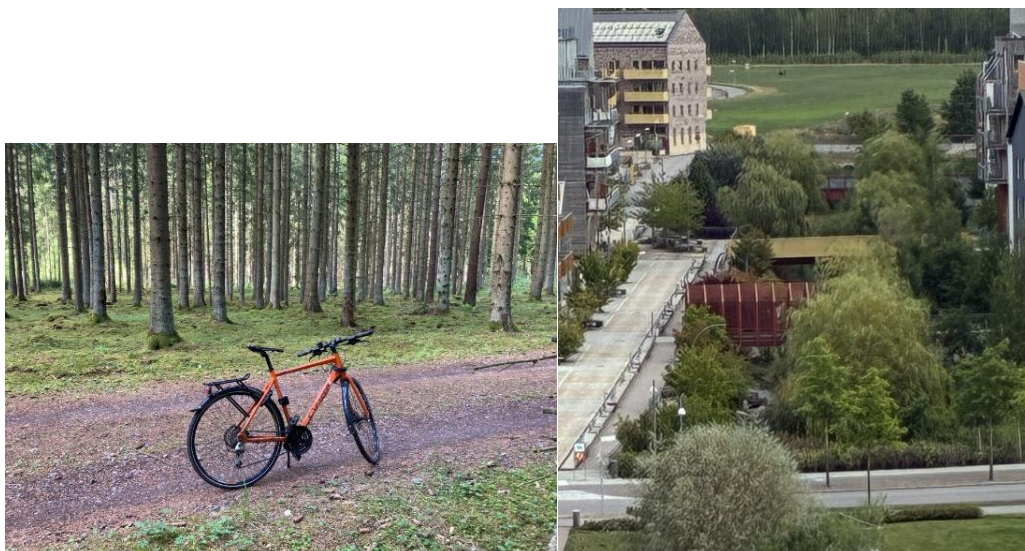
- Inom ledningsplatser (L1 och L2)
- Inom nästen (L3)
- Vid databasuppdatering eller synkronisering
- Vid överföring av nyttolast (sensordata) mellan UAV:er eller mellan UAV och markstation, om kommunikationsavståndet inte är över ca 1-1,5 km.
- För backhaul-kommunikation, troligen med relänoder för att öka kommunikationsavståndet

De ovan identifierade användningsfallen bygger i första hand på direktsikt mellan sändare och mottagare. Med en ökad kunskap om prestanda i skogsmiljö kan användningsfallen potentiellt utökas.

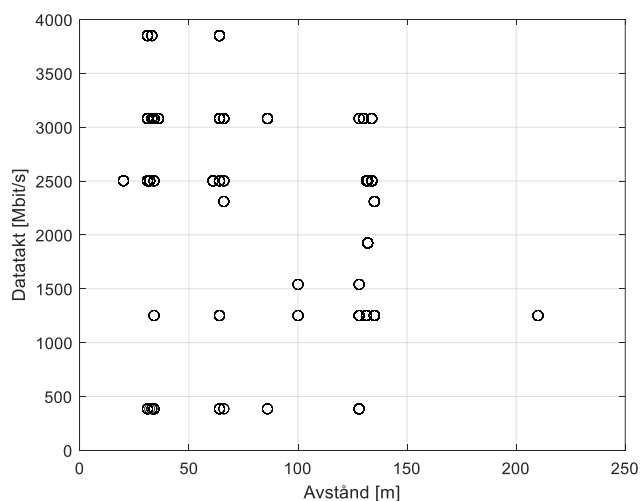
Titel/Title  
60 GHz-kommunikation i militära tillämpningarMemo nummer/Number  
FOI Memo 9145

## 5 Genomförda mätningar

Under 2025 har mätningar av möjligt kommunikationsavstånd genomförts med ett kommersiellt radiosystem som baseras på IEEE 802.11ad. Mätningarna har genomförts i en granskog, men som referens har mätningar även gjorts för fall med direktsikt mellan sändare och mottagare, se foton från de två miljöerna i Figur 3. Granskogen var gles utan grenar närmast marken, vilket kan ses som en representativ miljö för militär gruppering av fordon på en ledningsplats. Mätningarna i granskog visar att systemets registrerade datatakt varierar mycket mellan de olika mätningarna för ett givet kommunikationsavstånd, se Figur 4. Systemet som användes har den lägre uteffekten (EIRP 40 dBm) och en maximal datatakt på knappt 4 Gbit/s. Kommunikationsavstånd på 100-200 m verkar vara möjliga att uppnå i den aktuella skogsterrängen. De uppmätta kommunikationsavstånden ligger i linje med vad tidigare mätningar har visat, men är längre än de avstånd som visas i Figur 2. De tidigare beräkningarna var baserade på en av få tillgängliga kanalmodeller för granskog där skogen förmodligen var något tätare.



Figur 3 Skogsmiljö respektive direktsiktmiljö där mätningar har bedrivits för att undersöka möjliga kommunikationsavstånd.



Figur 4 Registrerad datatakt som funktion av avstånd i granskog.

Titel/Title  
60 GHz-kommunikation i militära tillämpningar

Memo nummer/Number  
FOI Memo 9145

## 6 Behov av fortsatt forskning

Kommunikation på 60 GHz har möjlighet att ge datataktiker som kan vara svåra att uppnå på lägre frekvenser. Kommunikationsavstånden blir relativt korta, 1-1,5 km, i miljöer där det är fri sikt mellan sändare och mottagare, och avsevärt kortare i skogsmiljö. Tillgängliga vågutbredningsmodeller för kommunikation på 60 GHz i skogsmiljö baseras på ett mycket begränsat mätunderlag. Det är därför svårt att bedöma vilka kommunikationsavstånd som kan förväntas i skog. Under året har kommunikationsprestanda undersökts i skogsterräng. Mätningarna pekar på att kommunikationsavstånden blir något längre än de som tidigare beräknats. Det är dock fortfarande oklart hur möjligheten till kommunikation är i skogsterräng. Det behövs mer underlag för att kunna avgöra i vilka skogsmiljöer och för vilka militära användningsfall som 60 GHz-kommunikation är lämplig.

Idag finns produkter som bygger på den kommersiella standarden IEEE 802.11ad. Standarden har utvecklats för andra scenarier (inomhusscenarier och direkt-siktsscenarioer i stadsmiljö) än vad som i första hand anses vara intressanta militära tillämpningar. Standarden IEEE 802.11ay är under utveckling och kommer att erbjuda ännu högre datataktiker än IEEE 802.11ad; ännu finns dock inga produkter tillgängliga. Det pågår också test och försök med radiokommunikation på 60 GHz för militära tillämpningar i andra länder. Kommande militära produkter kan antingen bygga på de civila standarderna eller vara specialdesignade för militära tillämpningar.

De flesta 60 GHz-system kan skapa nät av enheter, vilket är en viktig funktion i militära tillämpningar. Det vore därför intressant att undersöka systemens nätbildande tekniker.

I Sverige är det möjligt att använda hela bandet 57-71 GHz, vilket medför att system skulle kunna växla mellan frekvenser med mer eller mindre syreabsorption, med konsekvensen att kommunikationsavståndet kan öka på bekostnad av att upptäcktsrisken ökar. Denna flexibilitet är intressant att utforska för militära tillämpningar.

Om tekniken ska användas i militära tillämpningar är det viktigt att undersöka hur tåligt systemet är mot störning. Det finns också mekanismer i de kommersiella standarderna som kan vara olämpliga i militära tillämpningar. Ett exempel på en sådan mekanism är antennriktningsförfarandet hos IEEE 802.11ad som innebär att noderna inledningsvis sänder i olika riktningar vilket kan vara olämpligt då det gäller upptäcktsrisk. Det är därför viktigt att följa utvecklingen hos både kommersiella system och kommande militära system.

## 7 Referenser

- [1] T. Moskaliuk and B. Malatest. (2023) Russia versus Ukraine and the role of software-defined radios. [Online]. Tillgänglig: <https://www.afcea.org/signal-media/cyber-edge/russia-versusukraine-and-role-software-defined-radios>.
- [2] P. Holm, B. Lundborg, and B. Asp, "Attenuation at 60 GHz propagation through Swedish pine forest," Swedish Defence Research Agency, FOI Command and Control systems, Department of Communication systems, Linköping, Sweden, FOI Memo Dnr 02-2453:1, december, 2002.
- [3] P. Holm, B. Lundborg, and B. Asp, "Attenuation at 60 GHz propagation through Swedish pine forest," FOI, Swedish Defence Research Agency, Linköping, Sweden, FOI Memo Dnr 02-2453:1, oktober, 2002.
- [4] B. Asp, "Systemlänk för kommunikation vid 60 Ghz. Förstudie," FOI, Swedish Defence Research Agency, Linköping, Sweden, FOI Report FOA-R-99-01229-616, Dec. 1999.

Titel/Title  
60 GHz-kommunikation i militära tillämpningar

Memo nummer/Number  
FOI Memo 9145

- [5] A. Eversden. (2020) US army looks to millimeter waveforms to strengthen communications. [Online]. Tillgänglig: <https://www.c4isrnet.com/battlefield-tech/it-networks/2020/12/30/usarmy-looks-to-millimeter-waveforms-to-strengthen-communications/>.
- [6] K. Wiklundh, G. Bark, G. Eriksson, K. Fors, P. Holm, ” 60 GHz in military use cases,” FOI-rapport FOI-D--1369—SE, december, 2024.
- [7] K. Wiklundh, K. Fors, P. Holm, G. Bark, and G. Eriksson, ” The Applicability of 60 GHz Wireless Communications in Military Use Cases,” Proc. International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS) 2025, 13-14 maj, 2025.
- [8] IEEE Std 802.11ad-2012, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Standard for Information technology— Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks— Specific requirements, december, 2012.
- [9] Multiple-Gigabit/s radio equipment operating in the 60 GHz band; Harmonised Standard for access to radio spectrum, ETSI Standard EN 302 567 V2.2.1, juli, 2021.
- [10] Post- och telestyrelsens föreskrifter om undantag från tillståndsplikt för användning av vissa radiosändare, Post- och telestyrelsens författningssamling Standard PTSFS 2022:19, december, 2022.
- [11] The European commission, “Decisions commission implementing decision (EU) 2019/1345 of 2 august 2019 amending decision 2006/771/EU updating harmonised technical conditions in the area of radio spectrum use for short-range devices,” in Official Journal of the European Union, no. 2019/1345, 2019.
- [12] RF085 Cable specification, Insulated Wire, 2024. [Online]. Tillgänglig: [https://insulatedwire.com/wp-content/uploads/2024/11/Insulated-Wire\\_catalog-RF805-series-pages.pdf](https://insulatedwire.com/wp-content/uploads/2024/11/Insulated-Wire_catalog-RF805-series-pages.pdf).
- [13] J. F. Harvey, M. B. Steer, and T. S. Rappaport, “Exploiting high millimeter wave bands for military communications, applications, and design,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 52 350 – 52 359, 2019.
- [14] Dimensionerande scenario brigadledningskompani 25, Försvarmakten Markstridsskolan, Sweden, Teknisk rapport, december, 2023.
- [15] System Reference document (SRdoc); Technical characteristics of Multiple Gigabit Wireless Systems (MGWS) in radio spectrum between 57 GHz and 71 GHz, ETSI Technical report EN 103 583 V1.1.1, augusti, 2019.