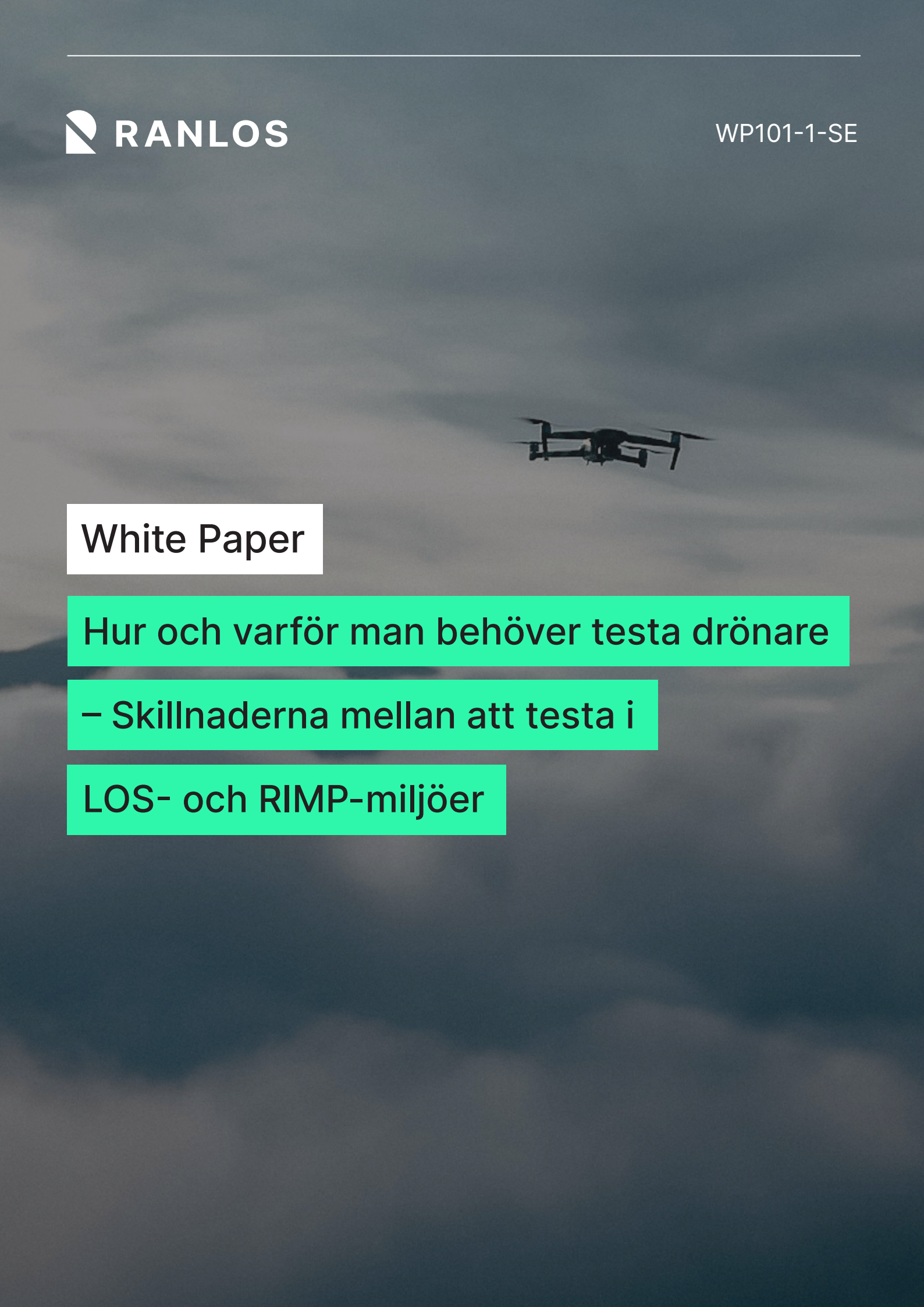
RANLOS

WP101-1-SE



White Paper

Hur och varför man behöver testa drönare – Skillnaderna mellan att testa i LOS- och RIMP-miljöer

Introduktion: Hur och varför behöver drönare testas?

Drönare och UAV-system har på kort tid gått från nischade lösningar till en central del av modern industri, infrastruktur och säkerhet. De används idag i allt från industriell inspektion och autonoma transportsystem till avancerade försvarsapplikationer. Gemensamt för dessa tillämpningar är att de bygger på en förutsättning som inte får fallera: en stabil och tillförlitlig trådlös kommunikationslänk.

Traditionella mätmetoder, där antenner och övriga radiokomponenter testas separat – och där antennen ofta mäts i en ekofri kammare – ger viktiga insikter men fångar inte hur systemet beter sig i verklig drift. När antennen integreras i drönaren påverkas dess prestanda av konstruktion, materialval och interaktionen med andra komponenter. Resultatet blir att den faktiska radioprestandan ofta skiljer sig från den teoretiskt förväntade. Det är här OTA-testning (Over-The-Air) blir avgörande. Genom att testa hela systemet i en kontrollerad radiomiljö kan man mäta hur kommunikationen faktiskt fungerar – under förhållanden som bättre speglar verklig användning.

Samtidigt är det viktigt att förstå att drönare inte används i en enhetlig radiomiljö. Kraven på kommunikation varierar beroende på applikation och omgivning.

En drönare i tätort omges av reflektioner från byggnader, fordon och infrastruktur – en så kallad RIMP-miljö (Rich Isotropic Multipath). En drönare över öppna fält, krigsområden eller en UAV på hög höjd verkar däremot i en radiolänk som i praktiken domineras av en direkt signalväg – en radiolänk som i praktiken domineras av en direkt signalväg – en LOS-miljö (Line-of-Sight). Dessa två miljöer ställer olika krav på drönarsystemets antennprestanda och kan exponera olika typer av svagheter i systemdesignen.

I praktiken innebär detta att man behöver kunna analysera både komplexa multipath-miljöer och situationer där kommunikationen domineras av fri sikt. I nästa avsnitt introduceras dessa två referensmiljöer – RIMP och LOS – som bygger på forskning från Chalmers tekniska högskola, ledd av professor Per-Simon Kildal och vidareutvecklad tillsammans med bland andra Jan Carlsson och kollegor. Dessa utgör tillsammans det teoretiska ramverket för denna typ av OTA-testning och ligger till grund för detta white paper.

> ***"För att utveckla och verifiera drönarsystem krävs testmetoder som speglar de radiomiljöer där systemen faktiskt ska fungera."***

Slutligen är det värt att notera att många moderna drönarapplikationer, särskilt inom industri och försvar, i stor utsträckning verkar i miljöer där fri sikt är den dominerande faktorn. Det innebär att förståelsen för hur antennen beter sig över olika riktningar och orienteringar ofta är avgörande för systemets verkliga prestanda – och därmed särskilt väl fångas genom LOS-baserad testning i kontrollerade testmiljöer.

Faktaruta: Begreppsdefinitioner

- I detta arbete används begreppet LOS (Line-of-Sight) för att beskriva radiomiljöer där den direkta signal-vägen dominerar mellan sändare och mottagare.
- För att analysera variationer kopplade till drönarens orientering används en statistisk modell som ibland benämns RLOS (Random Line-of-Sight), där "random" syftar på variation i orientering – inte i själva mätningen.
- RanLOS används i detta dokument enbart som namn på företaget och dess testsystem, vilka realiserar en LOS-miljö.

Två kompletterande testmiljöer

Forskning vid Chalmers tekniska högskola, etablerad av professor Per-Simon Kildal och hans kollegor (Carlsson, Carlberg & Kildal, LAPC 2012 samt Kildal + Carlsson, 2013), har etablerat ett teoretiskt ramverk för OTA-testning baserat på två definierade referensmiljöer: RIMP (Rich Isotropic Multipath) och LOS (Line-of-Sight). I detta sammanhang används LOS som övergripande begrepp, medan RLOS (Random Line-of-Sight) beskriver den statistiska modell som används för att analysera variationer kopplade till drönarens slumpmässiga orientering.

Dessa miljöer representerar två ytterligheter i hur radiovågor beter sig i verkligheten. Även om praktiska scenarier ofta ligger någonstans däremellan, gör uppdelningen det möjligt att analysera och förstå olika aspekter av ett systems radioprestanda på ett strukturerat sätt.

I en RIMP-miljö sprids signalen via många vägar och når mottagaren från flera riktningar, vilket är typiskt för exempelvis stadsmiljöer och komplexa installationer. I en LOS-miljö domineras kommunikationen istället av en direkt signalväg, vilket är vanligt i öppna miljöer eller vid operation på hög höjd.

De två miljöerna belyser olika egenskaper hos antenn- och kommunikationssystem:

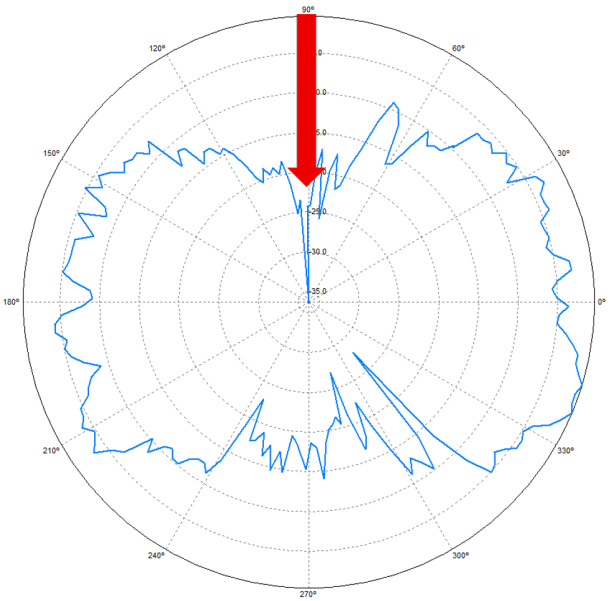
- **RIMP** ger insikt i hur systemet presterar i komplexa multipath-miljöer
- **RLOS** visar hur antennens riktningsegenskaper påverkar länken i fri sikt

En viktig skillnad mellan miljöerna framträder när man analyserar signalens statistiska variation.

I en RIMP-miljö följer variationerna i signalnivå en väletablerad Rayleigh-fördelning. Förenklat innebär detta att signalen varierar slumpmässigt, men på ett sätt som gör att antennens riktningsegenskaper får begränsad påverkan på det övergripande resultatet. I praktiken innebär det att en antenn med ojämnt strålningsdiagram ofta ändå kan prestera relativt stabilt i denna typ av miljö, där den totala strålningsverkningsgraden blir den avgörande faktorn.

I en LOS-miljö är situationen annorlunda. Eftersom kommunikationen domineras av en enskild signalväg får antennens strålningsdiagram direkt genomslag i resultatet. Om antennen har riktningar med låg förstärkning – så kallade dippar – kan detta leda till en ökad sannolikhet för låga signalnivåer och därmed risk för länkavbrott. Ett exempel på detta illustreras i Figur 1.

Tillsammans utgör dessa två miljöer ett teoretiskt ramverk för att analysera trådlös prestanda i olika typer av användningsfall. I följande avsnitt beskrivs respektive miljö mer i detalj, samt hur de används i praktisk OTA-testning.

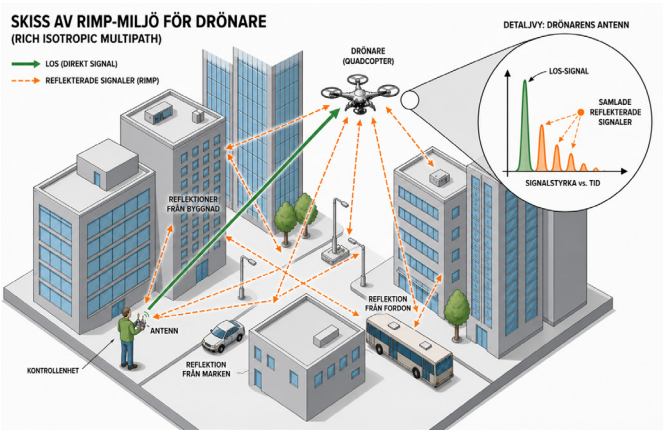


Figur 1: Antennens strålningsdiagram med en tydlig dipp i diagrammet. Kommunikation i den riktningen påverkas därför kraftigt.

RIMP – Rich Isotropic Multipath

I en RIMP-miljö anländer radiovågor till mottagarantennen från alla riktningar med statistiskt sett lika sannolikhet. Signalerna reflekteras, diffrakteras och sprids av omgivande objekt – byggnader, fordon, vegetation, människor – och skapar ett tätt, statistiskt jämnt fördelat flervägsfält. Detta är den typiska radiomiljön i städer, i industriella inomhusmiljöer, och generellt i alla förtätade miljöer.

Den mottagna signalens amplitud följer i dessa fall en Rayleigh-fördelning, vilket innebär att det finns en statistisk sannolikhet för djupa signalfall (“fades”) – tillfälliga dalar i mottagen signalstyrka. Systemets robusthet avgörs därför i hög grad av antennens förmåga att hantera dessa variationer, exempelvis genom diversitet, MIMO-teknik eller hög strålningsverkningsgrad.



Figur 2: RIMP-miljö (Rich Isotropic Multipath) för drönare i tätort. Direktsignalen (LOS) kompletteras av reflektioner från fasader, mark och kanter. Detaljvyn visar hur signalerna når drönarantennen med olika fördröjningar och skapar en fördelad Rayleigh-liknande mottagning.

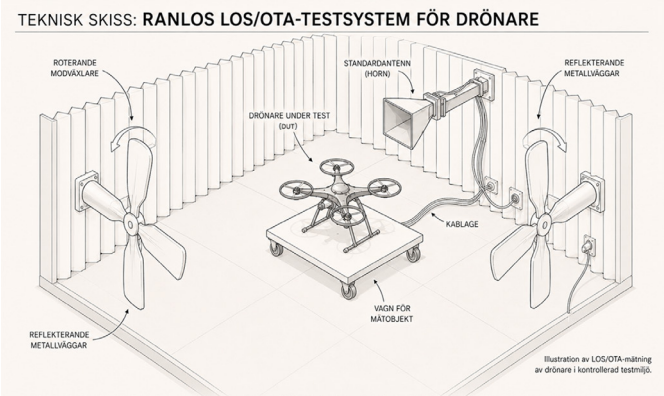
Vad RIMP-mätningen avslöjar

RIMP-mätningar ger insikt i hur ett system presterar i komplexa radiomiljöer där multipath dominerar, och används för att analysera:

- Total strålningsverkningsgrad (TRP och TIS)
- Antennkorrelation och möjligheten till effektiv diversitetskombination
- MIMO-prestanda och kanalkapacitet
- Förekomst av fading och hur väl systemet hanterar dessa variationer
- Effekter av oönskad koppling mellan antenner i flerantennsystem

Modväxlarkammare som RIMP-laboratorium

RIMP-miljöer realiseras i laboratoriemiljö med hjälp av en så kallad modväxlarkammare (reverberation chamber). Detta är ett slutet metallrum där roterande omrörare (“stirrers”) kontinuerligt förändrar de elektromagnetiska moderna i kammaren. Resultatet blir ett statistiskt homogent och isotropt fält, där signaler når testobjektet från alla riktningar över tid – en kontrollerad representation av en RIMP-miljö.
Drönaren placeras i mitten av kammaren och mätningarna integreras över ett stort antal stirrer-positioner, vilket ger ett stabilt och reproducerbart medelvärde av antenn- och systemprestandan.



Figur 3: Modväxlarkammare för RIMP-laboratoriemätning. Metallväggarna utgör en resonant kavitet; två roterande modväxlare ändrar moderna kontinuerligt och genererar ett statistiskt isotropt fält. Drönaren (EUT) står på en positioneringsvagn i mitten.

Begränsning för RIMP i kontext av drönare

En viktig egenskap hos RIMP-miljön är att variationer kopplade till antennens riktningsegenskaper i stor utsträckning jämnas ut av den omgivande multipath-strukturen. Det innebär att en antenn med ojämnt strålningsdiagram ofta kan prestera relativt stabilt i RIMP, eftersom signaler alltid når mottagaren via alternativa vägar.

För system där kommunikationen i stor utsträckning sker i fri sikt – såsom många drönarapplikationer inom exempelvis försvar – kan detta innebära att vissa kritiska svagheter, exempelvis riktningar med låg antennförstärkning, inte framträder i RIMP-testning trots att de kan vara avgörande i verklig drift.

LOS – Line-of-Sight (RLOS-modell)

I en LOS-miljö domineras radiomiljön av en direkt radiokanal mellan sändare och mottagare – där den direkta signalvägen dominerar över eventuella reflektioner. Detta är situationen för drönare som flyger på hög höjd, över öppen terräng, landsvägar, över vatten eller i glest bebyggda landsbygdsområden. Radiolänken är ofta stabil och förutsägbar, men samtidigt blir antennens riktningsegenskaper avgörande för den faktiska prestandan.

Till skillnad från multipath-miljöer, där signaler når mottagaren via flera vägar, finns det i LOS-miljö i praktiken ingen alternativ signalväg som kan kompensera för variationer i antennens riktningsegenskaper. Det innebär att antennens beteende i varje enskild riktning får direkt genomslag i den mottagna signalen.

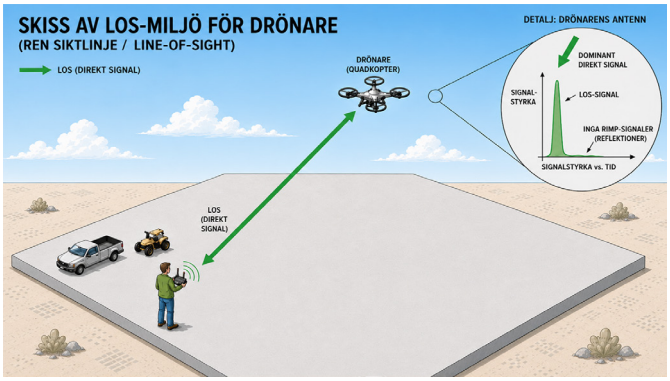
Den slumpmässiga aspekten i denna modell (RLOS) uppstår inte från miljön, utan från drönarens rörelse. Under verklig drift kan drönaren anta en godtycklig tredimensionell orientering relativt markkontrollstationen. Det är denna uppsättning av orienteringar – snarare än tidsvariationer i radiomiljön – som ger upphov till variationer i signalnivå och som analyseras statistiskt.

Vad LOS-/RLOS-mätning avslöjar

LOS-/RLOS-baserade mätningar ger en direkt bild av hur antennens riktningsegenskaper påverkar kommunikationslänken och används för att analysera:

- Antenndiagrammets täckning över hela 3D-sfären
- Polariseringsmatchning mot markkontroll-stationens antenn
- Räckviddsbudget och maximalt kommunikationsavstånd
- Förekomst av nollmönster och blinda vinklar

Till skillnad från RIMP, där miljön kan maskera vissa variationer, visar LOS-miljön tydligt hur systemet presterar i varje riktning och orientering.



Figur 4: LOS-miljö (Line-of-Sight) över öppen terräng. Endast den direkta signalvägen når drönaren – inga reflektioner från omgivningen. Antennens 3D-täckning blir avgörande eftersom drönarens orientering relativt markstationen varierar slumpmässigt.

Konsekvenser för drönarsystem

Eftersom kommunikationen i en LOS-miljö domineras av en direkt signalväg – utan reflektioner som kan kompensera för svaga riktningar – blir antennens beteende avgörande i varje given orientering. För drönare innebär detta att kommunikationslänken kan variera kraftigt beroende på hur systemet är orienterat vid varje given tidpunkt.

Om antennen till exempel har ojämn täckning, riktningar med låg förstärkning eller bristande anpassning mellan sändarens och mottagarens polarisation (det vill säga hur antennerna är riktade i förhållande till varandra), kan detta leda till att signalnivån i vissa lägen blir för låg – trots att länken i andra orienteringar fungerar väl.

I praktiken innebär detta att systemets prestanda blir starkt beroende av orientering. Det kan visa sig som:

- tillfälliga avbrott i kommunikationen (intermittenta länkavbrott)
- variationer i signalstyrka beroende på riktning
- begränsningar i hur långt bort drönaren kan operera med bibehållen stabil länk

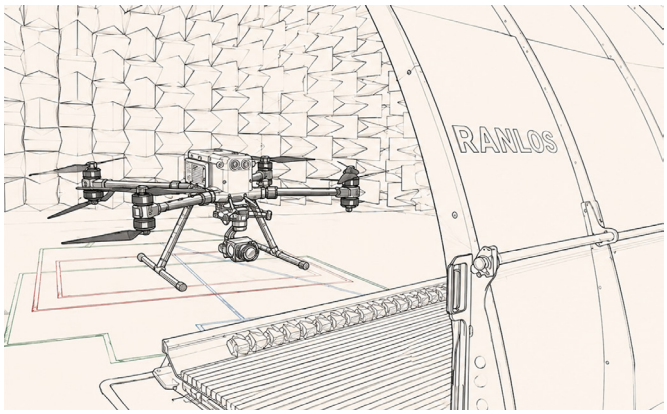
Denna typ av beteende är särskilt kritisk i applikationer där drönarens orientering inte kan kontrolleras exakt, eller där en stabil och förutsägbar kommunikationslänk är avgörande för uppdragets genomförande.

LOS-testning med CATR-teknik

För att kunna reproducera LOS-förhållanden (i praktiken ofta analyserade med RLOS-modell) i en kontrollerad laboratoriemiljö används CATR-teknik (Compact Antenna Test Range). Ett CATR-system är utformat för att skapa en plan vågfront i mätzonen, vilket motsvarar hur en radiosignal beter sig när den kommer från en sändare på stort avstånd.

I praktiken innebär detta att systemet omvandlar signalen från en närfältskälla till en fjärrfälts-liknande våg i realtid. Testobjektet – i detta fall drönaren – exponeras därmed för en signal som beter sig som om den kommer från en avlägsen sändare, med en definierad riktning och utan påverkan från oönskade reflektioner. RanLOS BeamForce-system bygger på denna princip, där en antennarray tillsammans med en reflektor formar signalen till en plan våg i mätzonen. Samtidigt kan absorberande material användas i kammaren för att minimera reflektioner, vilket säkerställer att mätningen representerar en fri-sikt-situation så nära verkligheten som möjligt.

För att fånga hur systemet beter sig i verklig drift roteras drönaren i flera dimensioner under mätningen. Detta innebär att antennens prestanda inte bara utvärderas i en enskild riktning, utan över ett stort antal orienteringar som motsvarar hur drönaren faktiskt rör sig i luften. Resultatet blir inte en enstaka mätpunkt, utan en beskrivning av hur systemet presterar över hela 3D-sfären och för olika orienteringar. Därmed blir det möjligt att identifiera riktningar eller lägen där prestandan är begränsad – något som annars kan vara svårt att upptäcka med traditionella testmetoder.



Figur 5: RanLOS CATR-lösning

Varför LOS-testning är kritisk för drönare

För många drönarapplikationer är den avgörande frågan inte hur systemet beter sig i en komplex multipath-miljö, utan om kommunikationen förblir stabil när drönaren ändrar orientering i en fri-sikt-situation.

Detta gäller särskilt för:

- industriella tillämpningar i öppna miljöer
- långdistansoperationer
- försvars- och säkerhetskritiska system

RanLOS testlösningar adresserar denna problemställning direkt. Genom att exponera antennens verkliga beteende i olika riktningar gör metoden det möjligt att identifiera kritiska svagheter tidigt i utvecklingsprocessen – innan de visar sig som problem i fält.

När räcker LOS-baserad testning?

Även om RIMP- och LOS-miljöer tillsammans ger en komplett bild av ett systems radioprestanda, är det i praktiken inte alltid nödvändigt att testa i båda miljöerna. I många tillämpningar är det de fri-sikt-scenarier som LOS-scenarier representerar som dominerar systemets verkliga användning. I dessa fall blir antennens riktningsegenskaper, orienteringsberoende variationer och faktisk räckvidd de avgörande faktorerna för kommunikationslänkens prestanda. Det innebär att LOS-/RLOS-baserad testning i många situationer kan ge tillräcklig – och direkt relevant – information för både utveckling och verifiering.

Typiska tillämpningar där RanLOS är tillräckligt:

- **Drönare i öppna miljöer**
  Vid användning inom exempelvis lantbruk, skogsbruk eller energiinfrastruktur opererar drönare ofta över stora områden med fri sikt. Här är det viktigare att förstå täckning, räckvidd och orienteringsberoende variationer än multipath-effekter.
- **Operation på hög höjd eller över långa avstånd**
  I scenarier där drönaren befinner sig högt över marken eller långt från operatören domineras kommunikationen av en direkt radiolänk. Systemets robusthet avgörs då i stor utsträckning av antennens egenskaper i olika riktningar.
- **Försvars- och säkerhetskritiska system**
  I många försvarstillämpningar är en stabil fri-sikt-länk avgörande för att säkerställa kontroll och datakommunikation. RanLOS-testning ger direkt insikt i dessa kritiska scenarier.
- **Utveckling och designoptimering**
  Vid utveckling av nya drönarsystem eller optimering av antenndesign samt placering ger RanLOS snabb och tydlig feedback på hur förändringar påverkar verklig prestanda. Detta möjliggör snabbare iteration och bättre designbeslut.

Vad LOS-/RLOS-testning fångar

RanLOS-testning fokuserar på de parametrar som ofta är direkt kopplade till verkliga problem i fält:

- hur antennen täcker olika riktningar
- hur systemet påverkas av orientering
- var det finns risk för låg signalnivå
- hur räckvidden varierar i praktiken

I många fall är det just dessa faktorer som avgör om ett system fungerar tillförlitligt eller inte.

När RIMP tillför värde

Det är samtidigt viktigt att understryka att RIMP-testning fortsatt är relevant i scenarier där multipath dominerar, exempelvis:

- tät stadsmiljö
- industriella installationer
- komplexa inomhusmiljöer

I dessa fall kan RIMP ge kompletterande insikt i hur systemet hanterar reflektioner, fading och multipla signalvägar.

Sammanfattningsvis, för komplett karakterisering är både RIMP- och LOS-testning värdefulla. Men för många drönarapplikationer – särskilt i fri-sikt-scenarier – ger LOS-baserad testning, realiserad genom RanLOS testlösningar, den mest relevanta, praktiska och direkt användbara insikten.

Standardisering och regulatorisk relevans

OTA-testning av drönare är ett aktivt område inom standardisering och regulatorisk utveckling. Organisationer som ETSI och 3GPP arbetar med ramverk och krav för trådlös kommunikation i UAV-system, inklusive 5G-baserade C2-länkar. Samtidigt ställer det europeiska regelverket, genom EASA och U-space, ökade krav på verifiering av kommunikationslänkens robusthet som en del av certifieringsprocessen.

En gemensam utgångspunkt i dessa arbeten är att testning behöver spegla de radiomiljöer där systemen faktiskt ska fungera. Det innebär att både multipath-scenarier (RIMP) och fri-sikt-scenarier (LOS/RLOS) inkluderas i metodiken. Detta understryker behovet av testmetoder som inte bara uppfyller tekniska krav, utan också är relevanta ur ett regulatoriskt perspektiv.

Slutsats

Drönare opererar i ett brett spektrum av radiomiljöer – från komplex flervägsutbredning i urbana miljöer till fri sikt i öppna landskap och på hög höjd. Varje miljö ställer olika krav på antenn- och systemprestanda, och kan avslöja olika typer av svagheter i designen.

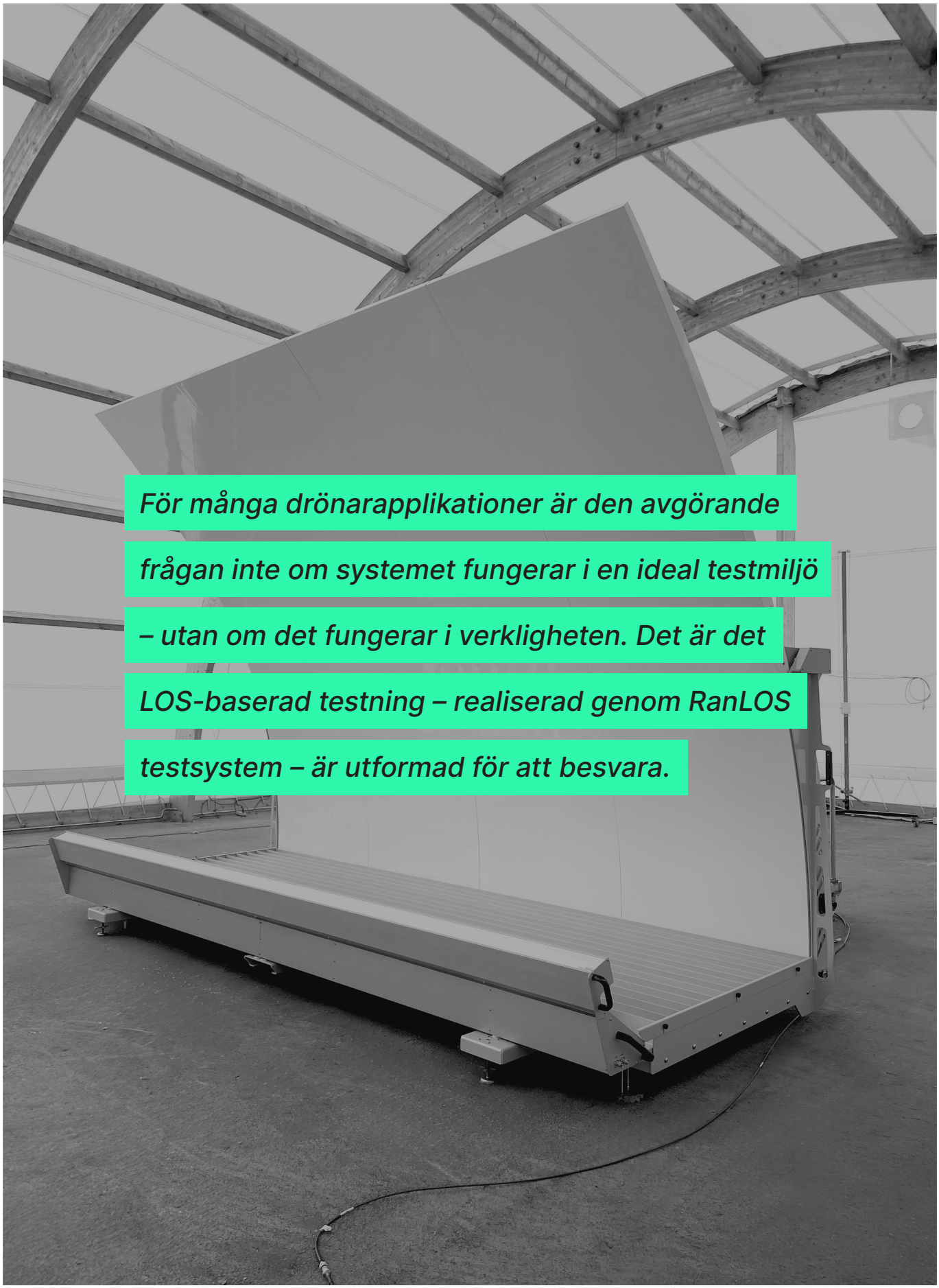
Forskningen från Chalmers har etablerat ett tydligt ramverk där RIMP och LOS representerar två kompletterande ytterligheter. Tillsammans ger de en djup förståelse för hur trådlösa system beter sig i verkliga driftförhållanden.

För utveckling och verifiering innebär detta att:

- RIMP-testning ger insikt i systemets prestanda i komplexa multipath-miljöer
- LOS-baserad testning visar hur antennens riktningsegenskaper påverkar kommunikationslänken i fri sikt
- Kombinationen av dessa metoder minskar risken för dolda svagheter som annars kan leda till länkavbrott eller bristande uppfyllnad av regulatoriska krav

Samtidigt visar praktiska användningsfall att många drönarapplikationer i stor utsträckning opererar i miljöer där fri sikt dominerar. I dessa fall blir LOS-baserad testning särskilt relevant – och RanLOS CATR-baserade lösningar gör det möjligt att genomföra denna typ av testning på ett repeterbart och utvecklingsnära sätt.

Detta innebär att fri-sikt-scenarier kan reproduceras i laboratoriemiljö och integreras som en kontinuerlig del av utvecklingsprocessen, vilket möjliggör snabbare iteration, bättre beslutsunderlag och minskad risk i senare skeden.


För många drönarapplikationer är den avgörande frågan inte om systemet fungerar i en ideal testmiljö – utan om det fungerar i verkligheten. Det är det LOS-baserad testning – realiserad genom RanLOS testsystem – är utformad för att besvara.

Referenser

1. J. Carlsson, U. Carlberg, P.-S. Kildal, “Diversity Gains in Random Line-Of-Sight and Rich Isotropic Multipath Environment”, invited presentation at 2012 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC), Loughborough, England, 12-13 Nov., 2012.

2. P.-S. Kildal, J. Carlsson, “New Approach to OTA Testing: RIMP and pure-LOS as Extreme Environments & a Hypothesis“, EuCAP, 7th European Conference on Antennas and Propagation, Gothenburg, Sweden, 8-12 Apr., 2013.