# Luftburna noder i marknät

Slutrapport

KARINA FORS, ANDERS HANSSON, SARA LINDER,
ULF STERNER, SARA ÖRN TENGSTRAND OCH ULRIKA UPPMAN

FOI-R--3973--SE
ISSN 1650-1942 December 2014

Karina Fors, Anders Hansson, Sara Linder, Ulf Sterner,
Sara Örn Tengstrand och Ulrika Uppman

# Luftburna noder i marknät

Slutrapport

Bild/Cover: Niclas Ehlén/Combat Camera/Försvarmakten

| | |
|---|---|
| Titel | Luftburna noder i marknät – Slutrapport |
| Title | Airborne Nodes in Communication Networks – Final Report |
| Rapportnr / Report No. | FOI-R--3973--SE |
| Månad / Month | December / December |
| Utgivningsår / Year | 2014 |
| Antal sidor / Pages | 31 |
| ISSN | 1650-1942 |
| Kund / Customer | FM |
| Forskningsområde | 4. Informationssäkerhet och kommunikation |
| FoT område | Ledning och MSI |
| Projektnr / Project No. | E36056 |
| Godkänd av / Approved by | Christian Jönsson |
| Ansvarig avdelning | Informations- och aerosystem |


Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk. All form av kopiering, översättning eller bearbetning utan medgivande är förbjuden.

This work is protected under the Act on Copyright in Literary and Artistic Works (SFS 1960:729). Any form of reproduction, translation or modification without permission is prohibited.

# Sammanfattning

Projektet *Luftburna noder i marknät* (Lunar) utvärderar kommunikation i nät med både markbundna och luftburna noder. Projektet är ett treårigt FoT-projekt som startade 1 januari 2012 och avslutas 31 december 2014. I den här rapporten sammanfattas de resultat som tagits fram inom projektet. Tre olika scenarion för användande av luftburna noder har analyserats, radiolänksystem, taktiska marknät och kommunikation med helikopter.

I radiolänknät kan det vara svårt att ersätta delar av nätet med en luftburen nod och få samma räckvidder, eftersom den luftburna noden troligen använder en enklare antenn. För att få samma räckvidd behövs ofta behövs en antenn med någon form av förstärkning. Den främsta nyttan med luftburna noder i radiolänknät är sannolikt att de möjliggör ett system som inte kräver lika mycket förplanering och totalt sett är mer mobilt, men som har ungefär samma räckvidd som radiolänksystem.

I taktiska marknät kan datatakten höjas med hjälp av en luftburen nod. Resultat visar att datatakten kan förbättras avsevärt för broadcast-trafik i ett marknät med en upphöjd nod. Även i nät där trafiken går mellan par av noder, unicast-trafik, har en upphöjd nod visat sig vara användbar. I ett mobilt taktiskt marknät förändras hela tiden länkarna och det är därför svårt att effektivt skicka unicast-trafik och att använda en upphöjd nod kan förenkla problemet avsevärt.

För att undvika vådabeskjutning är det önskvärt att helikoptrar kan utbyta data med mobila marknät innan helikoptern kommer inom bekämpningsavstånd. Resultaten från räckviddsanalysen visar att det är möjligt då helikoptern har en hög flyghöjd, 1000 meter, men inte för låga flyghöjder, 5-20 meter. Dessutom visar analyser att helikoptrar som flyger över ett mobilt marknät kan skicka och ta emot trafik i ungefär samma utsträckning som marknoderna under de få minuter som helikoptrarna befinner sig över nätet. Att kunna kommunicera med mobila marknät i samband med överflygning är en efterfrågad förmåga som saknas i befintliga system.

Nyckelord: ad hoc-nät, UAV, luftburna noder, upphöjda noder, robust kommunikation

# Abstract

The project *Airborne nodes in communication networks* evaluates performance of communication networks with both ground based and airborne nodes. The project is a three-year project that started on January 1, 2012 and ends December 31, 2014. This report summarizes the results generated by the project. Three different scenarios have been analyzed, radio link systems, tactical ground networks and communication with a helicopter.

In radio link networks, it can be difficult to replace parts of the network with an airborne node and get the same range, as the airborne node probably uses a simple antenna. Often an antenna with a gain is necessary to obtain the same range. The benefit of an airborne node in a radio link network is likely that they enable a system with less pre-planning and more mobility, but has about the same range as a radio link system.

In tactical ground networks, data rate could be increased using an airborne node. Results show that the data rate can be significantly improved for broadcast traffic in a ground network with an airborne node. Moreover, in networks with traffic between pairs of nodes, unicast traffic, an airborne node has proved to be very useful. In a mobile network, links change constantly and therefore it is difficult to send unicast traffic effectively. Hence, using an airborne node can simplify the problem considerably.

In order to avoid friendly fire, it is desirable that helicopters can exchange data with ground networks before the helicopter comes within range of fire. The analysis shows that it is possible when the helicopter has a high altitude, 1000 meters, but not at low altitudes, 5-20 meters. In addition, results show that helicopters flying over a mobile network can send and receive traffic at about the same extent as the ground nodes during the few minutes that the helicopters are over the network. Being able to communicate with ground networks during the overflight is a desired ability missing in existing systems.


Keywords: ad hoc networks, UAV, airborne nodes, elevated nodes, robust communications

# Innehållsförteckning


**1 Inledning 7**
1.1 Bakgrund . . . 7
1.2 Sammanfattning av projektmål . . . 7
1.3 Sammanfattning av resultat . . . 8

**2 Radiolänk 9**
2.1 Scenarion och metod . . . 9
2.1.1 Långräckviddig radiolänk . . . 9
2.1.2 Ersätta mast . . . 9
2.1.3 Yttäckning bataljon . . . 10
2.1.4 Metod . . . 10
2.2 Resultat och slutsatser . . . 10

**3 Mobila taktiska marknät 13**
3.1 Scenario och systemantaganden . . . 13
3.2 Jämförelse nätstrukturer . . . 13
3.3 Routing i ad hoc-nät med upphöjd nod . . . 14
3.3.1 Systemkonfiguration för nätsimuleringar . . . 15
3.3.2 Marknät . . . 15
3.3.3 Aerostat . . . 16
3.3.4 UAV . . . 16
3.3.5 Helikopter . . . 16
3.3.6 Slutsatser och risker . . . 16

**4 Helikopterkommunikation 19**
4.1 Scenarier och frågeställningar . . . 19
4.1.1 Marknätsscenario . . . 19
4.1.2 Marint scenario . . . 20
4.2 Resultat och slutsatser . . . 21

**5 Kommunikation av resultat och samarbeten 23**
5.1 Publikationer . . . 23
5.1.1 Rapporter . . . 23
5.1.2 Memon . . . 23
5.1.3 Konferensbidrag och artiklar . . . 24
5.1.4 Möten och presentationer . . . 24
5.2 Samarbeten . . . 25

**6 Sammanfattning 27**

**Referenser 29**

# 1 Inledning

Projektet *Luftburna noder i marknät* (Lunar) utvärderar kommunikation i nät med både markbundna och luftburna noder. Projektet är ett treårigt FoT-projekt som startade 1 januari 2012 och avslutas 31 december 2014. Projektet har haft en budget på 2,4 miljoner kronor det första året och 2,7 miljoner kronor per år de två sista åren. I den här rapporten sammanfattas de resultat som tagits fram inom projektet.

## 1.1 Bakgrund

Tack vare sin upphöjda position har luftburna noder goda kommunikationsförutsättningar. Tidigare studier har visat stora fördelar kommunikationsmässigt med luftburna noder. Framförallt har stora vinster visats i scenarion då en stor yta behöver täckas, till exempel en hel stad av Stockholms storlek eller en stor del av Östersjön. De luftburna noderna har ofta varit rätt stora flygplan eller aerostater för att kunna bära nödvändig kommunikationsutrustning. I och med den drastiskt ökade användningen av UAV:er både militärt och civilt utvecklas plattformarna, vilket medför att de troligen kan användas för fler tillämpningar. Den primära militära användningen av UAV:er idag är för spaning och övervakning, även om andra tillämpningar har undersökts, till exempel att förbinda olika marknät med varandra. En civil tillämpning som undersökts är att förse landsbygd med tillgång till internet, där Googles projekt Loon är ett av de mer uppmärksammade. En översikt över olika tillämpningar för luftburna noder i kommunikationssystem finns i [1].

Att utan fast infrastruktur kunna upprätthålla kommunikation över en stor yta är en utmanande uppgift. Tack vare sin upphöjda position har luftburna noder en kommunikationsfördel och i projektet undersöks hur stora dessa fördelar är och hur de kan användas. En upphöjd nod kan vara en högt placerad marknod eller en luftburen nod, till exempel en helikopter eller en UAV.

I projektet har tre scenarion använts för analys och utvärdering:

- Användning av upphöjda noder i radiolänknät (exempelvis för luftvärn eller rörliga anslutningspunkter i en stab).
- Användning av upphöjda noder i ett mobilt marknät.
- Högmobila noder i marknät, exempelvis helikopter.

I de två första scenarierna är den upphöjda noden till för att förstärka eller ersätta delar av marknätet medan i det sista scenariot är det den högmobila noden som har ett behov av kommunikation.

## 1.2 Sammanfattning av projektmål

Målet med projektet är att förorda lösningar för hur olika typer av upphöjda noder på ett effektivt sätt kan integreras och utnyttjas i marknäten och vilka konsekvenser detta får för användarna.

Några delmål har också varit att :

- Besvara vilka krav som ställs på en upphöjd nod för att den ska kunna ersätta delar av ett radiolänknät.
- Undersöka om luftburna noder kan användas för att erhålla yttäckande samband över en större yta.
- Ta fram metoder för att kunna analysera vinster med upphöjda noder.
- Analysera vad som krävs av upphöjda noder för att de ska bidra till taktiska marknät och hur stora kan vinsterna bli.
- Svara på om helikoptrar kan anslutas till marknät och vilka effekter det i så fall får i marknätet.

Ett annat viktigt mål för projektet har varit att ha en aktiv dialog med FM och FMV, dels för att kontinuerligt föra över resultat och dels för att fånga upp viktiga frågeställningar för FM. Målet är att de resultat och den kompetens som projektet genererat ska komma till användning vid kravställning, upphandlingar och modifieringar av FMs taktiska kommunikationssystem.

Målsättningen har även varit att publicera resultat vetenskapligt för att resultaten och metoderna ska utsättas för vetenskaplig granskning.

## 1.3 Sammanfattning av resultat

Att ersätta delar av ett radiolänknät med en luftburen nod kan vara svårt, till stor del beroende på att parabolantenner med hög antennvinst används i radiolänknät medan det är rimligt att använda en enklare antenn i en luftburen nod som inte är helt stilla. Vilken antenn som används i den luftburna noden har stor påverkan på räckvidden. Exempelvis kan räckvidden bli lika lång, eller längre, än i ett radiolänknät då en antenn med en antennvinst på 10 dB används, ungefär motsvarande en sektorantenn. Nyttan med luftburna noder i radiolänknät är sannolikt att de kräver mindre förplanering och totalt sett ger ett mobilare system med samma räckvidd, snarare än längre räckvidd. Om en avancerad antenn kan användas i den luftburna noden kan räckvidden förlängas.

För taktiska marknät kan datatakten förbättras avsevärt om en upphöjd nod tillförs. Detta gäller både om den upphöjda noden befinner sig ovanför nätet eller en bit ifrån marknätet. För att förbättra datatakten behöver den luftburna noden befinna sig på över 50-150 meters höjd, beroende på terräng. Att inkludera terrängen i analyserna har visat sig vara viktigt för att kunna dra rättvisande slutsatser, om terrängen inte inkluderas kan vinsterna med en upphöjd nod överskattas. Prestanda för ett ad hoc-nät och ett centraliserat nät med en basstation jämfördes och prestanda var jämförbara i de flesta scenarion. Ad hoc-nätets större robusthet visar sig framförallt vid svåra förhållanden. Detta leder till att ad hoc-nät är att föredra för kuperad terräng, då den upphöjda noden befinner sig på låg höjd eller då avståndet mellan marknätet och den upphöjda noden är stort.

Även i ett nät där trafiken går mellan par av noder, unicast-trafik, har en upphöjd nod visat sig vara användbar. I ett mobilt taktiskt marknät förändras hela tiden länkarna

i nätet och det är därför svårt att effektivt skicka unicast-trafik. Att använda en upphöjd nod kan förenkla problemet, däremot finns en risk att länken via den upphöjda noden blir en flaskhals då all trafik kommer att routas via denna. Det är därför viktigt att systemet har en väl fungerande resursfördelningfunktion i nätet för att kunna utnyttja fördelarna med en upphöjd nod.

För att undvika vådabeskjutning är det önskvärt att helikoptrar kan utbyta data med mobila marknät innan helikoptern kommer inom bekämpningsavstånd. Inom projektet har en räckviddsanalys genomförts som visar att detta är möjligt på en hög flyghöjd, 1000 meter. För låga flyghöjder, 5-20 meter, är inte kommunikationsräckvidden tillräcklig för att med normal flyghastighet hinna kommunicera utanför marknodernas bekämpningsavstånd. Även kommunikation med mobila marknät i samband med överflygning har undersökts, vilket är en efterfrågad förmåga som saknas i befintliga system. I scenariot flyger helikoptrar snabbt och på låg höjd över ett mobilt marknät. Resultaten visar att helikoptrar kan skicka och ta emot trafik i ungefär samma utsträckning som marknoderna under de få minuter som helikoptrarna befinner sig över nätet. Däremot dominerar inte reläfunktionen i helikopternoderna på samma sätt som hos en permanent luftburen nod, vilket är bra eftersom det skulle kunna leda till problem då helikoptrarna lämnar nätet.

# 2 Radiolänk

För att binda samman taktiska radionät med Försvarsmaktens fasta telenät, FTN, används ofta ett mobilt kärnnät. Det mobila kärnnätet byggs upp efter behov och består av radiolänkar monterade i flyttbara master. För att förbättra räckvidden placeras normalt masterna på upphöjda positioner i terrängen, och riktantenner används. Ofta krävs noggrann planering i förväg för att hitta bra placeringar för masterna. För att hantera mobilitet i de taktiska näten måste radiolänkarna omgrupperas efter hand som det taktiska nätet flyttar sig. Eftersom noderna inte kan användas medan masten förflyttas är det önskvärt att radiolänkarna har lång räckvidd och snabbt kan omgrupperas.

Ett alternativ till att använda master är att basera det mobila kärnnätet delvis på luftburna noder, som UAVer eller aerostater. Inom Försvarsmakten har det pågått ett projekt kallad *IPT Taktisk upphöjd relästation*, om nyttan med att använda luftburna relänoder för yttäckande samband. Detta beskrivs ytterligare i kapitel 5.2. Förhoppningen var att sådana noder skulle förbättra nätets förmåga att hantera dynamiska situationer. Exempelvis skulle räckvidden kunna bli längre om de upphöjda noderna får lägre länkdämpning, och det skulle kunna gå snabbare att gruppera en luftburen nod än att resa en mast, speciellt i fallet med en UAV. De scenarion som används här kommer både från försvarsmaktsprojektet och från arbete inom FoT-projektet.

Inom projektet har olika varianter av att använda en eller flera luftburna noder i ett mobilt kärnnät studerats. De luftburna noder som studerats är en mindre UAV eller en aerostat (ballong fjättrad vid marken). De flyger på måttlig höjd eftersom de inte ska vara för stora och ska gå snabbt att omgruppera. Nackdelen med en liten luftburen nod är att den kan ha lägre förmåga att bära last. Det kan också vara svårt att använda en antenn med hög antennvinst på en nod som är rörlig, eftersom en sådan antenn kräver inriktning. Därför har i alla scenarion antagits att den luftburna noden har en sektorantenn, till skillnad från riktantennerna som vi antagit för masterna. Med detta i beaktande har vi undersökt om det ändå är möjligt att få vinster med luftburna noder, i några olika tillämpningar.

## 2.1 Scenarion och metod

Tre olika typer av scenarion med luftburna noder har studerats. I den första typen handlar det om att basera systemet kring en luftburen nod. I den andra typen ersätter en luftburen nod en annan nod i ett befintligt radiolänknät. I det tredje scenariot är målet att använda den luftburna noden för att ge yttäckande samband. Scenariona har behandlats i [2] och [3], för ytterligare detaljer hänvisas dit. Dessa scenarion samt metoden som använts vid beräkningarna beskrivs kort i följande avsnitt.

### 2.1.1 Långräckviddig radiolänk

I scenariot är systemet baserat kring den luftburna noden. Denna används för att erhålla längre räckvidd än vad en mast hade givit. Räckviddsökningen kan användas i syfte att nå längre i ett hopp eller för att kunna ha färre hopp totalt. Detta kan vara fördelaktigt i olika situationer. Exempel på ett sådant scenario är ett länkstråk för överföring av

information mellan två olika platser där luftvärn är grupperat. I sådana fall kan avståndet vara långt, och det är viktigt att tidsfördröjningen hålls låg. Med längre räckvidd behövs färre reläande noder. Ett annat scenario är användning av en luftburen nod som relä för utökad räckvidd vid kommunikation med en stabsplats.

Med denna typ av scenarion blir det intressant att studera vilken räckvidd som kan erhållas, och hur terräng, val av antenner samt höjd på master och luftburna noder påverkar räckvidden.

### 2.1.2 Ersätta mast

I scenariot blir en luftburen nod, till skillnad från i det förra scenariot, en del av ett befintligt radiolänknät. I ett sådant fall kan den ersätta en markbaserad nod antingen tillfälligt eller permanent. Det primära önskemålet är att få högre rörlighet och snabbare gruppering, med samma räckvidd som med det långsammare mast-alternativet. Ett exempel på ett scenario är att tillfälligt ersätta en mast i det mobila kärnnätet, till exempel medan masten sätts upp eller om masten går sönder. Ett annat scenario är att ersätta en mast vid en stabsplats, antingen permanent eller inledningenvis medan stabsplatsen sätts upp. Detta i syfte att snabbare få tillgång till samband vid omgruppering.

I denna typ av scenarion blir det intressant att studera vilka krav som ställs på antenner och flyghöjder för att nå lika långt som i ett hopp mellan den typ av master som den luftburna noden ersätter.

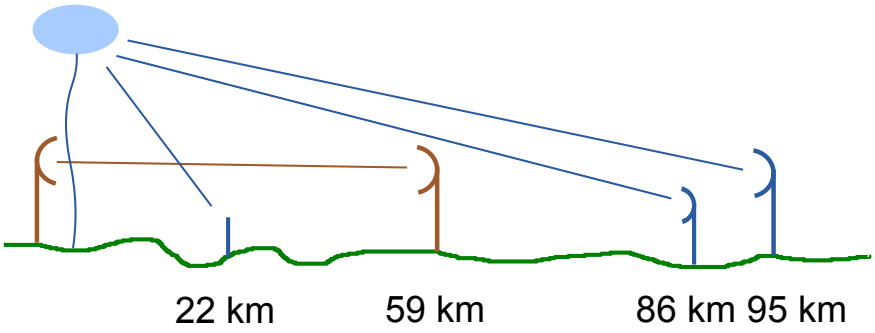
### 2.1.3 Yttäckning bataljon

I scenariot används en luftburen nod för att ge yttäckande samband över det område som en bataljon eller brigad förväntas röra sig över. Ytan som ska täckas har ett djup på 7-10 mil. Sambandet är tänkt att användas för kommunikation mellan en stabsplats och ett antal ledningsfordon. För att systemet ska vara mindre känsligt mot bekämpning är det i första hand önskvärt att ha den luftburna noden i bakkanten av området, och att inte ha några master på området. Om master ändå måste användas bör de gå snabbt att gruppera.

Här studeras om det räcker med en luftburen nod för att få den önskade räckvidden, eller om det behövs någon kombination av luftburen nod och master.

### 2.1.4 Metod

Beräkningar har genomförts för två olika typer av terräng med vågutbredningsprogrammet Detvag-90® [4] . I Detvag-90® beräknas länkdämpningen mellan två punkter med hänsyn till terrängen. I dessa beräkningar har frekvensen 1,35 GHz använts. Sektorantennen som antagits för den luftburna noden har en antennvinst på 10 dB, och riktantennerna som antas för masterna har en antennvinst på 26 dB.




Figur 2.1: Exempel på räckvidder i kuperad terräng.

## 2.2 Resultat och slutsatser

I figur 2.1 visas ett exempel på beräknade räckvidder i kuperad terräng, vid datatakten 2 Mbps. Den luftburna noden befinner sig på 300 m höjd och har en sektorantenn. Den kommunicerar antingen med en nod med rundstrålande antenn, monterad på marken eller i master som är 15 m respektive 25 m höga. Som jämförelse visas räckvidden mellan ett par av 25 m höga master. Samtliga master har riktantenner. Räckvidden mellan en luftburen nod och rundstrålande markantenn blir i detta exempel betydligt kortare än för ett hopp mellan master. Mellan luftburen nod och mast blir räckvidden istället längre.

I scenariot *yttäckning bataljon* är det inte möjligt att nå så långt som 7-10 mil i ett hopp med en rundstrålande antenn på marken. Räckvidden i det fallet är upp till ett par mil. Med en 15 m hög mast med riktantenn är det möjligt att nå ca 7 mil.

Resultaten visar att det har stor påverkan på räckvidden vilken typ av antenn det är möjligt att använda på den luftburna noden. Ofta behövs någon form av förstärkning i antennerna även med luftburen nod. Exempelvis kan man ofta få samma eller bättre räckvidd som mastalternativet med en antenn med en antennvinst på 10 dB, ungefärligen en sektorantenn. Det sker nu utveckling inom området elektriskt styrbara antenner, vilket möjligtvis kan ge högre antennvinst även på en rörlig plattform. En slutsats av beräkningarna är att det verkar svårt att ersätta riktantenner, som har hög antennvinst, med flyghöjd. Det är också svårt att få bättre räckvidd med med luftburna noder och rundstrålande antenner än med master med riktantenner, trots att de luftburna noderna bör få lägre länkdämpning. En förklaring är att det är svårt att tjäna så mycket på den lägre länkdämpningen som de 26 dB som antagits vara riktantennernas antennvinst.

Det spelar även stor roll vilken höjd det är möjligt att ha den luftburna noden på. Nyttan av att höja upp noden ytterligare jämfört med en mast beror rimligt nog på hur hög länkdämpningen är från början. Denna beror i sin tur på terräng och kommunikationsavstånd. Vid korta avstånd i plan terräng är länkdämpningen redan så låg att det inte finns så mycket att vinna. På större avstånd och i mer kuperad terräng kan det finnas vinster att göra i att höja noden även till höjder över den högsta som studerats här, 1000 m.

Det är troligen så att nyttan med luftburna noder inte ligger främst i att de skulle

få längre räckvidd, utan i att det går att få ett betydligt mobilare system med samma räckvidd. Masterna för markbaserade radiolänkhopp antas vara 25 m höga och har riktantenner, och att resa en sådan mast tar tid och förplanering krävs för att hitta lämpliga positioner.

# 3 Mobila taktiska marknät

Taktiska mobila marknät realiseras alltmer med hjälp av någon typ av ad hoc-nät. Gemensamt för dessa typer av nät är att de inte behöver någon fast infrastruktur utan bygger på att de kommunicerande noderna genom samarbete kan skapa ett fungerade kommunikationsnät. Genom att tillföra upphöjda noder till ett taktiskt marknät öppnas dock möjligheten för alternativa nätstrukturer, där exempelvis upphöjda noder fungerar som reläpunkter som återutsänder trafiken.

Inom projektet har huvudsakligen två frågeställningar rörande upphöjda noder i mobila taktiska marknät analyserats:

- Är en mer centraliserad nätstruktur lämpligare än en ad hoc-nätsstruktur om upphöjda noder tillförs?
- Hur påverkas routingprotokollet i ett ad hoc-nät av att en upphöjd nod tillförs?

I detta kapitel sammanfattas de studier som gjorts inom projektet rörande dessa frågor och vilka slutsatser som kan dras. Först beskrivs de scenario- och systemantaganden som ligger till grund för analyserna.

## 3.1 Scenario och systemantaganden

Det taktiska marknät som studeras består av ett antal noder som kommunicerar på frekvensbandet kring 300 MHz. Alla noder, både markbundna och luftburna, antas ha samma uteffekt och rundstrålande antenner.

Den trafik som det taktiska nätet ska stödja antas vara en mix av unicast-trafik, där en sändare sänder till en mottagare, multicast-trafik, där en sändare sänder till en grupp av mottagare och broadcast-trafik, där en sändare sänder till alla i nätet. Eftersom den senare typen kan antas vara dominerande, enligt tidigare studier [5], fokuseras frågan om lämpliga nätstrukturer på broadcast-trafik. För påverkan på routingprotokollet fokuseras dock på unicast-trafik då detta inte är lika analyserat, samtidigt som det är mer tekniskt utmanande än broadcast-trafik.

Vid modellering av marknät är det viktigt att terrängens påverkan på radiokanalen modelleras på ett realistiskt sätt. Här används vågutbredningsbiblioteket Detvag-90® [4] för att modellera terrängens påverkan på den storskaliga fädningen hos radiokanalen. I de fall den småskaliga fädningen modelleras antas den vara Rayleigh-fördelad. Två olika terrängtyper beaktas, dels ett kuperat skogsområde, dels ett plant slättlandskap.

Vid utvärdering av olika nätstrukturer för taktisk kommunikation är frågeställningar rörande robusthet och kapacitet för systemet centrala. Med robusthet avses här systemets förmåga att hantera mobilitet i fråga om att leverera trafik till avsedda destinationer. Kapaciteten ger ett mått på hur mycket trafik systemet kan hantera.

## 3.2 Jämförelse nätstrukturer

Taktiska militära marknät kan ha svårigheter med att tillgodose behovet av datatakt i nätet. Detta beror på att antennhöjderna är låga i förhållande till den omgivande terrängen, vilket leder till hög dämpning av kommunikationssignalen. En luftburen nod skulle kunna förbättra prestanda i marknätet eftersom den har en upphöjd position och bättre vågutbredningsförhållanden jämfört med enheter på marken. Den luftburna noden kan inkluderas i nätet på olika sätt, antingen som en basstation som vidarebefordrar all trafik eller som en nod med samma förmåga som övriga noder i ett ad hoc-nät. I taktiska marknät är en stor del av trafiken sådan att den ska nå fram till alla användare, så kallad broadcast. För att jämföra olika nätarkitekturer används ett kostnadsmått som beror på datatakt och antalet sändningar som behövs.

Terrängen som kommunikationsnätet befinner sig i påverkar prestanda för nätet, men vinster med att en luftburen nod tillförs analyseras ofta med hjälp av avståndsberoende kanalmodeller utan terränghänsyn. De analyserna är enklare att genomföra och oberoende av scenario. I projektet jämförs resultaten framtagna med en avståndsberoende kanalmodell med resultat beräknade med olika terrängtyper.

Ur kommunikationssynpunkt är den bästa placeringen av en luftburen nod oftast i centrum av nätet. Det kan däremot finnas andra anledningar till att placera den luftburna noden annorlunda. En anledning kan vara att den luftburna noden inte enkelt ska röja marknätets position. En annan anledning kan vara risken för bekämpning om noden är placerad för nära fienden. Därför är det intressant att undersöka hur långt ifrån marknätet den luftburna noden kan placeras och ändå bidra till förbättringar av nätets prestanda.

Resultat visar att datatakten kan ökas avsevärt i ett marknät om en luftburen nod tillförs. Detta gäller både om den luftburna noden befinner sig ovanför nätet eller en bit ifrån marknätet. Analysen visar att i en platt terräng ger de båda nätstrukturerna, basstation och ad hoc-nät, relativt lika resultat med en luftburen nod, förutom då den luftburna noden är på låg höjd vilket ger en lägre kostnad för ad hoc-nätstrukturen. Skillnaden är dock inte stor och det är ofta bättre att ha en basstation i en luftburen nod även på relativt låg höjd än ett ad hoc-nät utan luftburen nod. I mycket kuperad terräng, där noder kan vara skymda för den luftburna noden, är ad hoc-nät att föredra.

För att öka datatakten fem gånger jämfört med i ett ad hoc-nät utan luftburen nod bör den luftburna noden befinna sig på åtminstone 50-150 meters höjd. Vilken höjd som krävs beror förstås på vilken terräng som nätet befinner sig i. Då den avståndsberoende kanalmodellen användes var en höjd på 13 meter tillräckligt, detta visar även på nödvändigheten att använda en kanalmodell som tar terrängen med i beräkningarna för att få relevanta resultat.

Ad hoc-nätets robusthet visar sig framförallt vid svåra förhållanden. Detta leder till att ad hoc-nät är att föredra för kuperad terräng, då den luftburna noden befinner sig på låg höjd eller då avståndet mellan marknätet och den luftburna noden är stort. I de fall då den luftburna noden förväntas ha fri sikt till alla noder är en basstation att föredra, eftersom den arkitekturen ger större möjligheter att styra nätet och optimera trafik utan så mycket overhead. Ett centraliserat nät med en basstation är lättare att styra eftersom det räcker att all information finns i basstationen, det är dock en mycket mer sårbar lösning än ad hoc-nät. I den här jämförelsen är inte kostnaden för att styra

nätet i form av overhead-trafik medräknad men den mängden trafik är troligen större i ett ad hoc-nät. En utförligare beskrivning av arbetet och slutsatserna finns i rapporten [6].

## 3.3 Routing i ad hoc-nät med upphöjd nod

För att studera hur routingprotokollet i ett ad hoc-nät påverkas av en upphöjd nod har tre olika typer av scenarion med upphöjd nod studerats: en central aerostat, en cirkulerande UAV samt ett scenario med ett par snabbt överflygande helikoptrar. Frågeställningar och analyser har fokuserat på nätets robusthet och dess förmåga att leverera trafik till dess avsedda destination i nätet. Som nämndes i inledningen av kapitel 3 studeras att trafik av typen unicast skickas mellan noderna i nätet.

För att skicka unicast måste routingprotokollet hålla reda på sändvägen (routen) i nätet från sändarnoden till mottagarnoden, vilket kan innebära flera hopp via andra noder innan destinationen nås. Simuleringar har gjorts där vi använt Optimized Link State Routing Protocol (OLSR), vilket är ett relativt populärt routingprotokoll för ad hoc-nät [7] som ingår i flera av dagens militära vågformer.

För att jämföra resultat med och utan upphöjd nod i nätet utfördes ett antal simuleringar utan upphöjd nod för att se hur ett ad hoc-nät uppträder för unicast-trafik med denna typ av routingprotokoll. Resultatet visar tydligt att det är svårt att få fram unicast-trafiken i mobila nät där trafiken måste skickas flera hopp genom nätet för att nå destinationen. Vi har tidigare sett att broadcast med OLSR ger betydligt bättre resultat [5]. Broadcast-trafik i ett OLSR-protokoll får extra diversitet genom att trafiken sänds över flera möjliga vägar i nätet. Sannolikheten att ett datapaket inte kommer fram ens på någon av vägarna genom nätet är mycket liten. Unicast, däremot, är svårare eftersom datapaketet skickas den kortaste vägen och misslyckas om någon enstaka av länkarna längs vägen misslyckas.

I vissa fall kan det vara aktuellt att överväga broadcast som sändarmetod trots att trafiken endast ska nå en mottagare, för att på så vis få extra robusthet. Då sändarens trafik endast är ämnad för en specifik mottagare är dock unicast kostnadseffektivare än broadcast, eftersom trafiken då endast skickas till destinationsnoden, istället för till hela nätet. Givetvis minskar effektiviteten då unicast-trafiken som inte kommer fram eventuellt måste skickas om flera gånger av ett högre lager, exempelvis TCP/IP eller ARQ på applikationsnivå.

Då en upphöjd nod tillförs ett marknät kommer denna att nå många marknoder, i vissa fall når den upphöjda noden alla andra noder i nätet. Detta medför att antalet hopp kan reduceras till två då trafiken skickas via den upphöjda noden. Detta kan således avhjälpa de svårigheter vi ser med att routa unicast-trafik via multipla hopp i mobila ad hoc-nät.

### 3.3.1 Systemkonfiguration för nätsimuleringar

I simuleringarna som utförts har olika varianter av OLSR undersökts. Skillnaden mellan varianterna är hur de estimerar länkarnas kvalité. Då OLSR följer standarden enligt [7] estimeras länkkvalité genom att räkna antalet mottagna respektive tappade OLSR-

kontroll-paket. En annan variant av OLSR som vi tagit fram, utnyttjar istället information från det fysiska lagret för att estimera länkarnas kvalité [5]. Genom att använda information från fysiska lagret, som uppdateras snabbare, fås på så sätt ett mer aktuellt estimat av länkkvalitén.

Två olika grader av diversitet har antagits: *hög* och *låg* diversitet. Ett system med hög diversitet kan vara exempelvis ett bredbandigt system, ett MIMO-system, ett frekvenshoppande system som hoppar snabbare än en gång per paket eller ett system som har ett ARQ-protokoll på länknivå. Diversiteten antas vara tillräckligt hög för att systemet inte ska påverkas av kanalens småskaliga fädning. Systemet med hög diversitet kommer således enbart att påverkas av storskalig fädning. Ett system med låg diversitet kan exempelvis vara ett smalbandigt system, utan eller med långsamt frekvenshopp. Dess låga diversitet gör att systemet kommer att påverkas av både stor- och småskalig fädning. Vidare har olika terrängtyper studerats, vilka påverkar den storskaliga fädningen i kanalen. Terrängens påverkan har dock inte varit lika avgörande som graden av diversitet hos systemet.

För att avgöra hur väl ett nät fungerar mäts dess förmåga att leverera trafiken till dess destination. Måttet på mottagen trafik anger andelen paket som kommer fram då paket skickas mellan två slumpvis utvalda noder. Detta mäts i simuleringar med olika förbundna nät. En nivå på minst 90 % mottagna paket anses vara ett rimligt minimikrav. Detta krav bör gälla då nätet är så pass sammanbundet att ca 1/3 av nätets noder är enhoppsgrannar, det vill säga kan nås med direktlänk.

Grundscenariot för simuleringarna är ett marknät bestående av 64 noder som rör sig slumpmässigt över en 8x8 km stor yta kring de områden som studerats. Hastigheten på noderna har varit 72 km/h (20 m/s) vilket motsvarar hastigheten av ett fordon. Vissa simuleringar har även utförts med mycket låg nodhastighet, 5 km/h motsvarande gånghastighet.

### 3.3.2 Marknät

Generellt är resultaten för marknätet dåliga, och i de flesta fall kommer systemet inte över kravet på 90% mottagen trafik. Speciellt svårt är det för OLSR-varianten som följer standarden. Den utökade varianten av OLSR, som nyttjar fysisk information för att bestämma länkkvalité, är dock något bättre. Anledningen till detta är att länkarna som bygger upp nätets topologi måste vara mycket stabila för att inte förändras snabbare än att routerna hinner uppdateras. För att välja ut stabila länkar krävs ett gott estimat på länkarnas kvalité.

Resultaten från simuleringarna visar att då kanalen lider av småskalig fädning krävs att systemet har hög diversitet. OLSR-varianten som följer standarden kan dessutom endast användas när noderna rör sig mycket långsamt (motsvarande gånghastighet). Då OLSR har utökats med länkkvalité baserat på information från fysiska lagret däremot, kan den användas även för nodhastigheter motsvarande fordon.

### 3.3.3 Aerostat

Utgående från nätet som beskrevs i avsnitt 3.3.1 placeras en 300 meter upphöjd nod i mitten av nätet, vilket skulle kunna motsvara en aerostat. Simuleringar visar tydligt hur antalet hopp för den trafik som går i nätet med den upphöjda noden i medel är nära två, med resultatet att kravet på 90% mottagen trafik uppfylls för alla de beskrivna systemuppställningarna, även för ett system med låg diversitet som påverkas av småskalig fädning.

Det kan dock noteras att den OLSR-variant som helt följer standarden får något sämre prestanda då nätet är på gränsen till helt förbundet enhoppsnät, jämfört med den utökade varianten som har ett mer aktuellt estimat av länkarnas kvalité. Det kan i dessa fall ”löna sig” att ta två hopp (via den upphöjda noden) istället för ett, då länken till den upphöjda noden i många fall är tillförlitligare än många andra länkar.

### 3.3.4 UAV

Då en UAV på 300 meters höjd cirkulerar kring nätets utkanter med en hastighet på 108 km/h, kommer länkarna mellan UAV-noden och marknoderna att förändras i snabbare takt än för fallet med en aerostat. Simuleringar visar dock att detta endast har en mindre påverkan på nätet. Nätet med UAV fungerar nästan lika väl som nätet med den stationära centrala aerostatnoden.

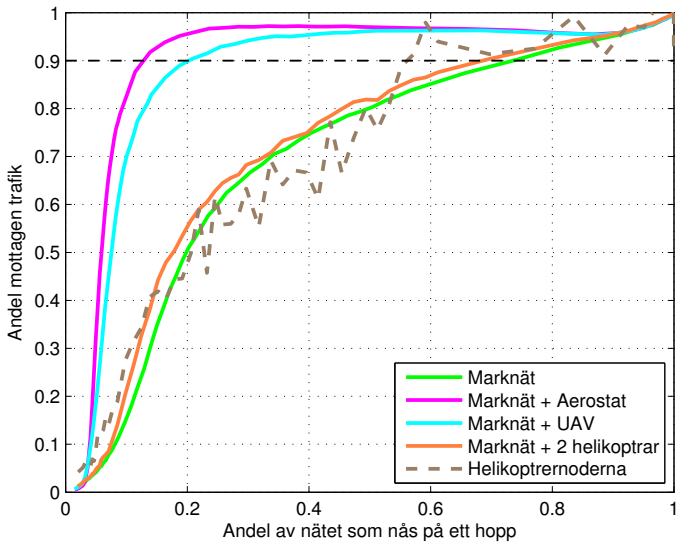
### 3.3.5 Helikopter

Ytterligare ett exempel av rörlig nod är en lågt och snabbt förbiflygande helikopter. För att kunna skicka trafik via den upphöjda noden måste nätet hinna ”ställa in sig”, vilket måste ske tillräckligt fort för att noden ska hinna användas innan den åter försvunnit ur räckhåll. Nätet måste samtidigt se till att använda tillräckligt stabila länkar i sina router, och inte använda de som dyker upp eller försvinner allt för fort, för att kunna bibehålla sin robusthet.

I detta scenario flyger två helikoptrar rakt över marknätet på relativt låg höjd, endast 20 meter, vilket motsvarar strax över trädtopparna, och med en hög hastighet på 216 km/h. Resultaten från simuleringarna visar att helikoptrarna inte har någon påverkan på nätet i stort. Helikopternoderna blir ytterligare noder i nätet och kommer att kunna skicka och ta emot trafik i ungefär samma utsträckning som marknoderna under de få minuter som helikoptrarna befinner sig över nätet, men de kommer inte att agera relänod på samma sätt som en aerostat eller UAV.

### 3.3.6 Slutsatser och risker

Den upphöjda noden som beskrivits i avsnitten 3.3.3 aerostat och 3.3.4 UAV har visat sig vara mycket användbar för att kunna skicka unicast-trafik i ett mobilt ad hoc-nät. Resultat från simuleringarna sammanfattas i figur 3.1, vilken visar fallet med låg diversitet. I figuren syns den uppenbara förbättringen från ett rent marknät till de scenarion som även har en upphöjd nod i form av aerostat eller UAV. Andelen mottagen trafik




Figur 3.1: Resultat från simuleringar med ett system med låg diversitet där OLSR nyttjar fysisk information för att estimera länkarnas kvalité. Kravet på 90% mottagen trafik är markerat med en horisontell streckad linje. X-axeln anger graden av förbundenhet i nätet genom att mäta andelen noder i nätet som nås på ett hopp.

är en bit över 90% då nätet är medelförbundet. Även helikopterns minimala påverkan på nätet visas i figuren, samt de två helikopternodernas förmåga att ta emot trafik i jämförelse med medelvärdet hos övriga noderna i nätet.

Det är dock viktigt att tänka på att det finns risk att länken till den upphöjda noden blir en flaskhals då all trafik kommer att routas via denna. Det är därför viktigt att systemet har en väl fungerande resursfördelningsfunktion i nätet för att kunna utnyttja fördelarna med en upphöjd nod. De noder som kräver mer resurser måste få större andel av dessa, exempelvis större andel av tidluckorna i ett TDMA-system. Det kan därför vara bra att ha i åtanke att det kan vara en teknisk utmaning att få resursfördelningen att fungera väl. Dock är det troligen lättare att fördela resurserna i nätet då endast en nod kräver extra mycket resurser, till skillnad från då flera noder i nätet är hårt belastade.

En risk med upphöjda noder som måste beaktas är att deras position gör dem sårbara. En synlig aerostat eller UAV kan lätt upptäckas och eventuellt förstöras av fiender. Då den upphöjda noden försvinner ur nätet kan dock ad hoc-nätet alltid falla tillbaka till ett helt markbundet nät. Prestandan återgår då till den för ett marknät, vilket beskrevs i avsnitt 3.3.2.

# 4 Helikopterkommunikation

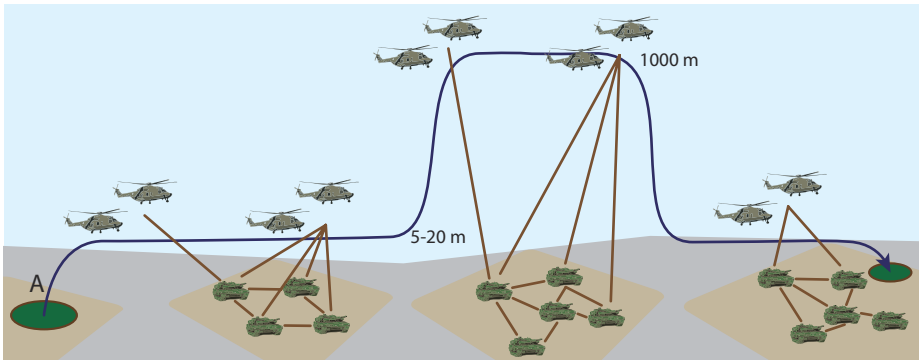
Projektet har undersökt hur helikoptrars kommunikationsbehov under flyguppdrag kan tillgodoses. I samarbete med Helikopterflottiljen i Malmslätt, Linköping, har två scenarier och tillhörande frågeställningar redovisats: ett scenario med mobila marknät och ett marint scenario. Arbetet i projektet har sedan fokuserats på att analysera kommunikation i samband med anflygning och överflygning i marknätsscenariot.

## 4.1 Scenarier och frågeställningar

I [1] analyseras kommunikationsbehov och typiska rörelsemönster för två olika helikopterscenarier: ett marknätsscenario och ett marint scenario. I marknätsscenariot ska helikopterenheten ge understöd till en snabbinsatsstyrka vid internationell insats. Scenariet kan användas för att undersöka helikopterns möjlighet att kommunicera med mobila markenheters radionät vid anflygning, överflygning och landning. Detta är en viktig frågeställning eftersom helikoptrar idag måste flyga runt egna markenheter för att undvika vådabeskjutning. Det marina scenariot beskriver skeendet under en marin övning i Östersjön där två oidentifierade ubåtar eventuellt kränker svensk kustlinje. Marina flyguppdrag kräver hög rörlighet över stora ytor.

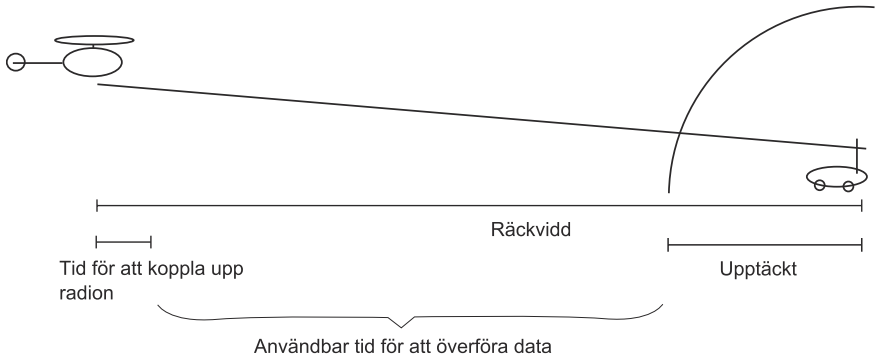
### 4.1.1 Marknätsscenario

Syftet med scenariot är att undersöka om helikoptrar kan kommunicera med mobila markenheters radionät vid anflygning, överflygning och landning. De viktigaste kommunikationsbehoven är i dessa fall tal och lägesinformation. Utan korrekt lägesinformation måste helikoptrar flyga runt egna markenheter för att undvika vådabeskjutning. Scenariot innebär att två helikoptrar lyfter från en bas eller framflyttad bas för transport till ett mobilt markförband 300 kilometer från startplatsen. På vägen dit flyger




Figur 4.1: Överflygning och anflygning med helikopter.

de rakt över två andra mobila förband, det första på låg höjd, 5-20 meter över marken, det andra på 1000 meters höjd. Inför landning går helikoptern ner på låg höjd ett par




Figur 4.2: Tid för kommunikation.

kilometer före landningsområdet och gör en rak inflygning på låg höjd för att inte röja förbandets position, se figur 4.1.

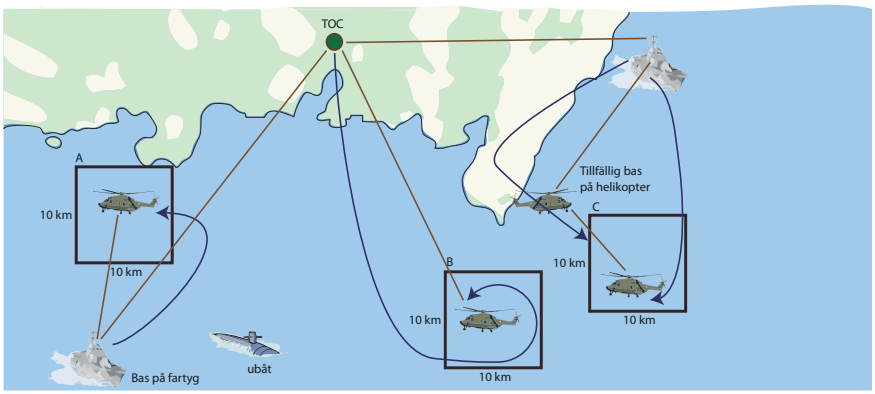
I scenariot antas att varje helikopter är utrustad med en radio av samma typ som markförbanden och kan ansluta direkt till markförbandens radionät. En viktig frågeställning att beakta är hur lång anslutningstid som krävs för att helikopterns radio ska hinna komma in i markförbandets nät och utbyta lägesbild innan risk för vådabeskjutning uppstår, se figur 4.2. Hur kommunikationsförmågan hos helikopter och markfordon påverkas är också intressant att utvärdera: stör helikopterns radio kommunikationen i marknätet eller ökar den marknätets kapacitet? Även helikopterns flyghöjd och hastighet, samt inverkan från terrängen, är viktiga parametrar att beakta.

### 4.1.2 Marint scenario

Det marina scenariot utspelas i Östersjön längs svenska kustlinjen och beskriver förloppet efter en indikation på att svenskt territorium har kränkts av en oidentifierad ubåt. En ubåtsjakt bedrivs längs kustlinjen och deltagande enheter är helikopter, korvett av typ Visby, minjaktfartyg och ubåt. I scenariot ska helikopterenheten bland annat kunna stödja ubåtsjakt över en yta på $10 \times 10$ kilometer i området där indikation finns på att kränkning skett. I ett marint scenario med låg hotbild flyger helikoptern på optimal höjd för kommunikation eller användning av radar och på låg höjd för fällning av bojar för sonar. Vid dataöverföringen står helikoptern stilla. Figur 4.3 beskriver tre delscenarier: ledning av ubåtsjakt från bas på Visbykorvett (till vänster), ledning av ubåtsjakt från bas på land (mitten) och ledning av ubåtsjakt från tillfällig bas på helikopter (till höger). På grund av flyguppdragets natur krävs exempelvis lång radioräckvidd, hög datatakt samt interoperabilitet med olika civila samt militära aktörer.

## 4.2 Resultat och slutsatser

I [8] analyserades möjliga räckvidder mellan helikopter och marknoder i ett nät i samband med helikopterns anflygning i projektets marknätsscenario. Marknoder och he-



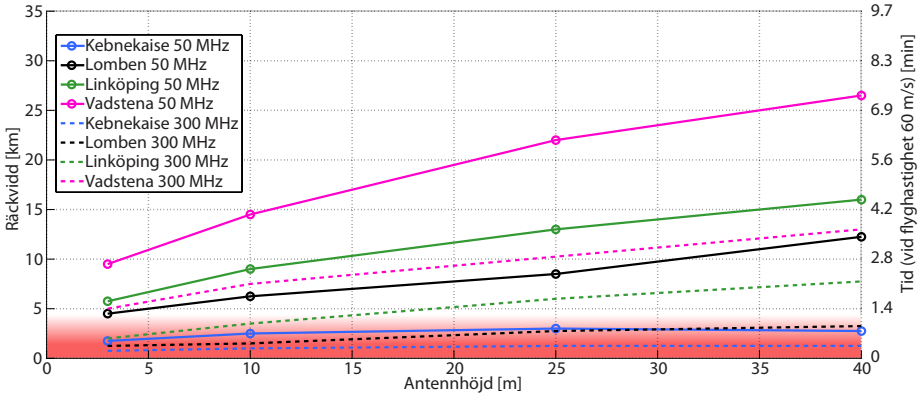

Figur 4.3: Marint scenario bestående av delscenarierna A, B och C. Sambandslänkar i uppdraget: mellan deltagande helikoptrar, fartyg och basen på land (TOC, Tactical Operation Center).

likopter använder en modern taktisk radio. Följande parametrar för radiosystemet har ansatts: bärvågsfrekvensen 50 MHz eller 300 MHz, bandbredden 25 kHz respektive 1 MHz samt sändareffekten 50 W respektive 44 W.

Inom ramen för scenariot har tre fall studerats. Det första fallet innebär att helikoptern flyger rakt in mot ett förband där en av marknoderna är utrustade med en mast med en höjd som varieras upp till 40 m. I det andra fallet flyger helikoptern in mot en grupp av stillastående fordon, var och en monterade med en tre meter hög antenn. I tredje fallet passerar helikoptern på ett avstånd vid sidan av marknoderna. I analysen har fyra olika terrängtyper använts: fjällterräng vid Abisko, kuperad terräng med skog och sjöar vid Lomben, småkuperad skogsbeklädd terräng söder om Linköping, och plan terräng utan skog vid Vadstena. Tre flyghöjder har beaktats: 5, 20 och 1000 meter.

Resultaten visar att möjlig kommunikationsräckvidd är terrängberoende för samtliga kombinationer av flyg- och antennhöjder. På låga flyghöjder blir räckvidden kort för frekvensen 300 MHz. Exempelvis fås räckvidder mellan 1,2 km och 10 km för en flyghöjd på 20 m även om marknoden har en mast på 25 m. Med 1000 m flyghöjd blir räckvidden betydligt längre, mellan 7 km och 55 km för 3 m antennhöjd för marknoden och mellan 9 km och 100 km för 25 meters masthöjd. Den lägre frekvensen på 50 MHz ger längre räckvidder. Med helikoptern på 20 m flyghöjd och en 25 m markantenn uppnås en räckvidd på 4-32 km, och på flyghöjden 1000 m med tremetersantennen 24-117 km.

Med antagandet att en marknod kan upptäcka helikoptern på avståndet 3 km, är radioräckvidden i många fall otillräcklig för att undvika vådabeskjutning för låga flyghöjder med normal flyghastighet. Detta illustreras i figur 4.4, där kommunikationsräckvidd med motsvarande flygtid visas för olika antennhöjder för marknoderna. Det rödmarkerade området längst ned i figuren markerar ett upptäcktsavstånd på ungefär 3 km. För att hinna identifiera helikoptern som icke fiende måste radion hinna ansluta till marknätet och överföra lägesinformation innan helikoptern upptäcks av förbandet på marken. Tiden för att ansluta till ett radionät är implementationsberoende, men kan antas vara i storleksordningen någon minut med GPS-stöd. I detta fall är räckvidderna




Figur 4.4: Kommunikationsräckvidd med motsvarande flygtid på flyghöjden 20 m för olika antennhöjder hos marknoden.

i de flesta fall bara tillräckligt långa om helikoptern flyger på den höga flyghöjden, 1000 m. Om frekvensen 300 MHz används blir det oavsett uppkopplingstid svårt att hinna kommunicera innan upptäckt om helikoptern flyger på de lägre höjderna.

Med frekvensen 50 MHz är räckvidderna längre, vilket ger mer tid till uppkopling. I de flesta fall finns här en tidsrymd om minst två minuter för att koppla upp en länk och utbyta data. Detta gäller även flyghöjden 1000 m i samtliga fall på frekvensen 50 MHz. Förutom i Abiskoterrängen tillåter scenarierna mellan 6 och 30 minuter för uppkoppling och kommunikation innan upptäckt, beroende på terräng och antennhöjd.

En snabb anslutning kräver att radion är konfigurerad för ett givet marknät. Om helikoptern flyger förbi flera markförband kan radion i stället behöva ställas om mellan de olika näten. Anslutningstiden kan då vara stor jämfört med tiden det tar att flyga mellan de två näten. På de högre flyghöjderna kan dessutom helikoptern befinna sig inom räckvidden för flera olika marknät samtidigt.

I projektet har även överflygning av marknät utvärderats, se avsnitt 3.3.5 och 3.3.6.

# 5 Kommunikation av resultat och samarbeten

Resultat från projektet har redovisats i ett antal rapporter och konferensbidrag vilka redovisas i detta kapitel. Även de samarbeten och större externa möten som projektet deltagit i redovisas.

## 5.1 Publikationer

### 5.1.1 Rapporter

De FOI-rapporter som skrivits inom projektet listas nedan.

- Luftburna kommunikationsnoder i marknät. – Omvärldsanalys och användarbehov. Författare: Ulrika Uppman, Karina Fors, Sara Linder, Anders Hansson, Ulf Sterner. År: 2012. FOI-R--3555--SE.
- Luftburna kommunikationsnoder i marknät. – Analys av helikopterscenario. Författare: Sara Örn Tengstrand. År: 2013. Rapportnummer: FOI-R--3820--SE
- Utvärdering av prestanda för marknät med en upphöjd nod. Författare: Karina Fors, Sara Linder, Sara Örn Tengstrand År: 2013. Rapportnummer: FOI-R--3789--SE.
- Luftburna kommunikationsnoder i marknät. Scenarioanalys mobilt kärnnät. Författare: Sara Örn Tengstrand. År: 2014. Rapportnummer: FOI-R--3861--SE.
- Räckvidder för radiolänkar till upphöjd nod. Författare: Sara Örn Tengstrand, Ulf Sterner. År: 2014. Rapportnummer: FOI-R--3951--SE.

### 5.1.2 Memon

Inom projektet har ett antal FOI-memon skrivits, framförallt har det rört sig om statusrapporter för projektet och redovisningar av informationsdagar. Memon har framförallt skickats till medlemmarna i referensgruppen.

- Lägesrapport för projektet luftburna noder i marknät. Författare: Sara Linder. År: 2012. Rapportnummer: FOI MEMO 4004.
- Lägesrapport för projektet luftburna noder i marknät 2013. Författare: Sara Linder, Ulf Sterner. År: 2013. Rapportnummer: FOI MEMO 4459.
- Luftburna noder i marknät – Redovisning av informationsdag Författare: Sara Linder. År: 2013. Rapportnummer: FOI MEMO 4696.
- Deltagande i NATO RTO IST-ET-069 Exploratory Team on Heterogeneous Networks Författare: Jimmi Grönkvist, Anders Hansson. År: 2014. Rapportnummer: FOI MEMO 4814.

- Lägesrapport för projektet luftburna noder i marknät 2014. Författare: Sara Linder, Ulf Sterner. År: 2014. Rapportnummer: FOI MEMO 4985.
- Luftburna noder i marknät – Redovisning av informationsdag 2014 Författare: Sara Linder. År: 2014. Rapportnummer: FOI MEMO 5123.

### 5.1.3 Konferensbidrag och artiklar

Arbetet i projektet har resulterat i ett flertal bidrag till vetenskapliga konferenser.

- An SDR implementation of a MIMO Communication Testbed. Författare: Patrik Eliardsson, Ulrika Uppman. *7th Karlsruhe Workshop on Software Radios - WSR´12*, Karlsruhe, 2012-03-07 - 2012-03-08, s.99-105
- Robust MPR-based flooding in mobile Ad-hoc networks. Författare: Jan Nilsson, Ulf Sterner. *MILCOM 2012*, Session NPP2, Orlando, 2012-10-30 - 2012-11-01.
- Antenna Gain Requirements of Airborne Nodes in Mobile Core Networks. Författare: Sara Örn Tengstrand, Ulf Sterner. *Military Communications and Informations Systems Conference, MCC*, Saint Malo, 2013-10-07 - 2013-10-09.
- Capacity Benefits of Airborne Nodes in Ad Hoc Networks with Broadcast Traffic. Författare: Sara Örn Tengstrand, Sara Linder, Karina Fors och Ulf Sterner. Kommer att skickas in till konferensen ICMCIS *International Conference on Military Communications and Information Systems*
- Performance of MPR-Based Broadcast Methods in Mobile Ad Hoc Networks for Rural Terrains. Författare: Jan Nilsson och Ulf Sterner. Kommer att skickas in till konferensen ICMCIS *International Conference on Military Communications and Information Systems*

En artikel är accepterad för publicering i en vetenskaplig tidskrift

- A Stochastic Channel Model for Simulation of Mobile Ad Hoc Networks. Författare: Gunnar Eriksson, Karina Fors, Kia Wiklundh och Ulf Sterner. Artikeln kommer att publiceras i tidskriften The Journal of Engineering (JoE) vilken ges ut av IET.

### 5.1.4 Möten och presentationer

Mottagare av projektet har varit Henrik Strand (HKV PROD LEDUND) och senare även Rasmus Nordström (HKV PROD LEDUND). I starten av projektet hölls ett möte med Henrik Strand (HKV), Ulrik Norlander (FMV) och Mikael Hjälle (HKV) för att diskutera viktiga frågeställningar och inriktning för projektet. Ett möte hölls även med Peter Krans (FMV) för att erhålla ytterligare information om radiolänkar och diskutera vilken nytta upphöjda noder skulle kunna göra i ett radiolänknät.

En referensgrupp har varit knuten till projektet och årligen återkommande möten har hållits med syfte att informera om verksamheten i projektet och få synpunkter på

inriktningen. Referensgruppen har bestått av deltagare från HKV, Helikopterflottiljen, MSS, LedR och FMV. De personer som ingått i referensgruppen är Henrik Strand (FM), Rasmus Nordström (FM), Lars Behm (FM), Jörgen Bergfeldt (FM), Thorbjörn Ericson (FMV), Kenneth Gerdeskans (FM), Magnus Grennvall (FM), Mikael Hjälle (FM), Stefan Karlsson (FMV), Peter Krans (FMV), Ulrik Nylander (FMV), Lars Robert Närlund (FMV), Johan Rydberg (FM) och Ola Winberg (FMV).

Projektet har även presenterat resultat på de årligen återkommande tekniksamordningsdagarna mellan FMV och FOI inom telekomområdet. Tillsammans med projektet ”Dynamisk resurshantering i taktiska nät” har två informationsdagar för FM och FMV ordnats där verksamhet från projekten presenterats. Informationsdagarna har hållits på FMV Tre Vapen i Stockholm i slutet av 2013 och 2014.

## 5.2 Samarbeten

Projektet har deltagit i NATOs arbetsgrupp NATO RTO IST-ET-069 Exploratory Team on Heterogeneous Networks. Arbetsgruppen har i uppdrag av Science & Technology Organization (STO), Information System Technology (IST) panel genomfört en förstudie inom området heterogena nät. Syftet var att identifiera viktiga områden för kommande studier inom taktiska heterogena nät och föreslå uppgifter och forskningsområden.

Förstudien resulterade i en treårig studie som startade 2014, IST-124-RTG-061 Heterogeneous Networks – improving connectivity and network efficiency. Studien leds av FFI i Norge och första mötet höls i Oslo i juni 2014, där de olika deltagarna presenterade sig och sin verksamhet inom området och viktiga forskningsfrågor för studien diskuterades. Ett andra möte hölls i oktober i Warsava inför vilket olika scenarion förbereddes och diskuterades på mötet. FOI bidrog med ett mobilt taktiskt scenario.

Projektet deltog under 2013 i IPT Taktiskt upphöjd relästation vilken leddes av Ledningsregementet på uppdrag av HKV. Målet av att utforma ett UTTEM för Taktisk upphöjd relästation. Målet var att kunna få yttäckande samband över en större yta och i studien undersöktes hur kraven på en sådan funktion skulle se ut. Projektet bidrog med kunskap och undersökte några av frågeställningarna noggrannare. Arbetet med att ta fram ett UTTEM avbröts vid årsskiftet 2013-2014 för att invänta resultat från andra studier inom FM.

Projektet har medfinansierat deltagande i projektet SafeCity inom EU:s 7:e ramprogram. SafeCity pågick under 24 månader med start 2011. Fokus i projektet har varit att göra allmänna stadsmiljöer säkrare med hjälp av en tillämpning av framtida internet. FOI har framförallt bidragit inom scenarioarbetet och den demonstration som hölls vid Arlanda i Stockholm. Ytterligare information om projektet finns på *http://www.safecity-project.eu/*.

# 6 Sammanfattning

I projektet har undersökts vad som krävs av en luftburen nod för att denna ska kunna ersätta delar av ett radiolänknät. Radiolänkar står ofta bra placerade i terrängen vilket ger bra vågutbredningsförhållanden. Dessutom används ofta parabolantenner med bra antennförstärkning vilket ger långa räckvidder. Att ersätta en knutpunkt med en luftburen nod kan därför vara svårt, eftersom det är rimligt att anta att denna använder en enklare antenn på grund av dess begränsade förmåga att bära last. Ofta behövs en antenn med någon form av förstärkning. Exempelvis går det ofta att få samma eller bättre räckvidd än med mastalternativet genom att använda en antenn med en antennvinst på 10 dB, vilket ungefär motsvarar en sektorantenn. I dagsläget sker en utveckling inom området elektriskt styrbara antenner, vilket möjligtvis kan ge högre antennvinst även på en rörlig plattform.

Den främsta nyttan med luftburna noder i radiolänknät är troligen inte att de ger längre räckvidd, utan att de möjliggör ett system som inte kräver lika mycket förplanering och totalt sett är mer mobilt, men som har ungefär samma räckvidd. De master som använts vid beräkningarna är 25 m höga med monterade riktantenner, och att resa en sådan tar tid samt kräver förplanering för att hitta lämpliga positioner.

Taktiska marknät kan idag ha svårt att tillgodose behovet av datatakt som finns. Med hjälp av en luftburen nod skulle datatakten kunna höjas. Resultat visar att datatakten kan förbättras avsevärt i ett marknät med en upphöjd nod. Detta gäller både om den upphöjda noden befinner sig ovanför nätet eller en bit ifrån marknätet. I analysen jämfördes metoderna basstation och ad hoc-nät, och i en platt terräng gav metoderna relativt lika resultat med en upphöjd nod. Emellertid gav ad hoc-nätet en lägre kostnad med den upphöjda noden på låg höjd. Skillnaden är dock inte stor och det är ofta bättre att ha en basstation i en upphöjd nod även på relativt låg höjd än ett ad hoc-nät utan upphöjd nod. I mycket kuperad terräng där noder kan vara skymda för den upphöjda noden är ad hoc-nät att föredra. För att öka datatakten fem gånger jämfört med i ett ad hoc-nät utan upphöjd nod bör den upphöjda noden befinna sig på åtminstone 50-150 meters höjd. Terrängen avgör vilken höjd som krävs. Ad hoc-nätets större robusthet visar sig framförallt vid svåra förhållanden. Detta leder till att ad hoc-nät är att föredra för kuperad terräng, med upphöjda noden på låg höjd eller då avståndet mellan marknätet och den upphöjda noden är stort. I de fall då den upphöjda noden förväntas ha fri sikt till alla noder är en basstationslösning att föredra, eftersom den arkitekturen ger större möjligheter att styra nätet och optimera trafikflöden utan så mycket overhead. Även i nät där trafiken går mellan par av noder, unicasttrafik, har en upphöjd nod visat sig vara mycket användbar. I ett mobilt taktiskt marknät förändras hela tiden länkarna och det är därför svårt att effektivt skicka unicast-trafik. Att då använda en upphöjd nod kan förenkla problemet, däremot ökas risken att länken via den upphöjda noden blir mycket belastad då all trafik kommer att routas via denna. Det är därför viktigt att använda en effektiv resursfördelning i nätet för att kunna utnyttja fördelarna med att införa en upphöjd nod.

För att undvika vådabeskjutning är det önskvärt att helikoptrar kan utbyta data med mobila marknät innan helikoptern kommer inom bekämpningsavstånd. Tiden för att ansluta till kommunikationsnätet har antagits vara i storleksordningen någon mi-

nut. Resultaten från räckviddsanalysen visar att det är möjligt att hinna utbyta data då helikoptern har en hög flyghöjd, 1000 meter. För låga flyghöjder, 5-20 meter, är inte kommunikationsräckvidden tillräcklig för att med normal flyghastighet hinna kommunicera utanför marknodernas bekämpningsavstånd. Även kommunikation med mobila marknät i samband med överflygning har undersökts, vilket är en efterfrågad förmåga som saknas i befintliga system. Ett fall med helikoptrar som snabbt, och på låg höjd, flyger över ett mobilt marknät har undersökts. Resultaten visar att helikoptrar kan skicka och ta emot trafik i ungefär samma utsträckning som marknoderna under de få minuter som helikoptrarna befinner sig över nätet. Däremot dominerar inte reläfunktionen i helikopternoderna på samma sätt som hos en permanent luftburen nod, vilket är bra eftersom det skulle kunna leda till problem då helikoptrarna lämnar nätet.

# Referenser

[1] Ulrika Uppman, Karina Fors, Sara Linder Anders Hansson och Ulf Sterner. Luftburna kommunikationsnoder i marknät, omvärldsanalys och användarbehov. Rapport FOI-R--3555--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI, Linköping, Sverige, Dec 2012.

[2] Sara Örn Tengstrand. Luftburna kommunikationsnoder i marknät - scenarioanalys mobilt kärnnät. Rapport FOI-R--3861--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI, Linköping, Sverige, Feb 2014.

[3] Sara Örn Tengstrand och Ulf Sterner. Räckvidder för radiolänkar till upphöjd nod. Rapport FOI-R--3951--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI, Linköping, Sverige, Okt 2014.

[4] B. Asp, G. Eriksson och P. Holm. Detvag-90® — Final Report. Scientific Report FOA-R–97-00566-504–SE, Defence Research Est., Div. of Command and Control Warfare Technology, Linköping, Sweden, september 1997.

[5] J. Nilsson och U Sterner. Robust MPR-based flooding in mobile ad-hoc networks. I: *MILITARY COMMUNICATIONS CONFERENCE, 2012 - MILCOM 2012*, 2012.

[6] Karina Fors, Sara Linder och Sara Örn Tengstrand. Utvärdering av prestanda för marknät med en upphöjd nod. Rapport FOI-R--3789--SE, Försvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, Sverige, december 2013.

[7] T. Clausen och P. Jacquet. Optimized link state routing protocol(OLSR). RFC 3626, IETF, Network Working Group, October 2003.

[8] Sara Örn Tengstrand. Luftburna kommunikationsnoder i marknät, analys av helikopterscenario. Rapport FOI-R--3820--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI, Linköping, Sverige, Sept 2013.

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