



Radionät för markförband

Slutrapport

JIMMI GRÖNKVIST, ANDERS HANSSON,
ARWID KOMULAINEN, MATTIAS SKÖLD,
ULF STERNER OCH ULRIKA UPPMAN

Jimmi Grönkvist, Anders Hansson,
Arwid Komulainen, Mattias Sköld, Ulf Sterner och
Ulrika Uppman

Radionät för markförband

Slutrapport

Titel	Radionät för markförband – Slutrapport
Title	Radio networks for ground forces – Final Report
Rapportnr / Report No.	FOI-R--5531--SE
Månad / Month	December / December
Utgivningsår / Year	2023
Antal sidor / Pages	24
ISSN	1650-1942
Kund / Customer	FM
Forskningsområde	Ledningsteknologi
FoT område	Ledning och MSI
Projektnr / Project No.	E51523
Godkänd av / Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Telekrig

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

Militära kommunikationsnät behöver under olika situationer kunna möjliggöra kommunikation både inom och mellan olika typer av förband. Detta blir allt viktigare på grund av arméns tillväxt, då större strukturer som brigad och division förväntas användas i allt större omfattning. Kraven på kapacitet i näten förväntas dessutom öka, bl.a. på grund av införande av nya typer av sensorer och ett snabbare krigsförlopp, vilket leder till att kommunikationsnäten kommer att behöva förbättras med nya tekniker. Denna rapport sammanfattar arbetet som utförts i FoT-projektet *Radionät för markförband*. Projektets mål var att utveckla kunskap för att stödja Försvarens förmågeutveckling inom robust trådlös kommunikation för markförband, speciellt gäller detta de taktiska radionäten och hur de ska sammankopplas. Detta är ett brett problemområde så inom projektet har ett antal delområden valts ut och problem inom dessa har undersökts. Ett exempel på detta är utvecklingen av ett koncept i vilket autonoma UAV:er fungerar som stödnät för kommunikationen på marken, med målet att tiodubbla kapaciteten. Mer forskning och utveckling behövs, men i de studier som genomförts har inga uppenbara hinder för konceptidén framkommit.

Nyckelord: taktiska radionät, SKB, UAV, brigadkommunikation

Abstract

Military communication networks need to efficiently enable communication for different scenarios both within and between different types of military units. This becomes more and more important due to the growth of the Swedish army, as the use of larger constellations as battalions and brigade becomes more common. The demand on network throughput is also expected to increase due to new sensors and a general faster battle progress, which will lead to needs for new and improved techniques. This final report summarizes the work done in the project *Radionät för markförband* (Radio networks for ground forces). The objective of the project has been to support the Swedish armed forces with information and knowledge of robust wireless communication, with a focus on improving the army's tactical radio networks and to investigate how these networks interact with each other. This is a very wide problem area so a few selected subareas have been chosen and studied. One example of this is the development of a concept with low-flying autonomous UAVs used to support the ground-based networks with an aim of increasing the capacity tenfold compared to current wideband networks. Further studies are needed for practical application but so far no obvious obstacles have been noted for the concept.

Keywords: tactical radio network, SCB, UAV, brigade communication

Innehållsförteckning

1	Introduktion	7
2	Synkroniserad kooperativ broadcast i smalbandiga nät	9
2.1	Användning av multipla kanaler	9
2.2	Inkrementell redundans	10
2.3	Slutsatser	11
3	Brigadkommunikation	13
3.1	Positionsförmedling inom brigad	13
3.2	Samutnyttjande av frekvenser mellan nät	14
3.3	Deltagande i Nato-gruppen STO IST-161	15
4	UAV-stödd radiokommunikation i mobila marknät	17
4.1	Konceptbeskrivning	17
4.2	Förutsättningar för konceptet	18
4.3	Upptäcktsavstånd	18
4.4	Slutsatser och fortsatt arbete	19
5	Sammanfattande slutsatser	21
	Referenser	24

1 Introduktion

Militära kommunikationsnät behöver möjliggöra kommunikation både inom och mellan olika typer av förband. Kraven på kapacitet i näten förväntas successivt öka, bl.a. på grund av införande av nya typer av sensorer och ett snabbare krigsförlopp. Samtidigt är alla radiosystem känsliga för telekrigspåverkan, vilket kan leda till kapacitetsförluster och kommunikationsavbrott. För att uppfylla de framtida behoven kommer kommunikationsnäten att behöva förbättras med nya tekniker, samtidigt som sammankoppling av näten blir allt viktigare för att rätt information ska finnas tillgänglig på rätt plats vid rätt tidpunkt.

Syftet med rapporten är sammanfatta arbetet som utförts i projektet *Radionät för markförband*. Projektets mål var att utveckla kunskap för att stödja Försvaretsmaktens förmågeutveckling inom robust trådlös kommunikation för markförband, speciellt gäller detta de taktiska radionäten och hur dessa ska sammankopplas. Detta är ett brett område så inom projektet har ett antal delområden valts ut och frågeställningar inom dessa undersökts.

Det första delområdet studerade möjliga förbättringar av smalbandiga vågformer. Dessa har normalt 25 eller 50 kHz bandbredd och planeras att användas av i princip alla markförband inom en överskådlig framtid. Speciellt viktiga är dessa vågformer för tal, men de kommer även bli allt relevantare för ökad användning av datatjänster. På grund av bandbredden är dock kapaciteten låg i dessa nät och med ökade behov av störskydd är det svårt att hantera ökande datamängder. Smalbandsnät är normalt enhoppsnät, men funktionalitet för vidareändning och automatiskt reläande börjar bli tillgängligt hos nyare vågformer. Detta har visats ge ökad robusthet som exempelvis kan användas till förbättrat störskydd och kapacitet [1]. Alternativt ger det möjlighet att sänka utsänd effekt vilket gör systemen svårare att upptäcka. Inom delområdet har möjligheterna att ytterligare förbättra mekanismer och prestanda för multi-hopp hos smalbandiga nät studerats.

Det andra delområdet var kopplat till utmaningar som uppstår på grund av arméns tillväxt, då större strukturer som brigad och division förväntas användas i allt större omfattning. Inom en brigad kommer ett stort antal radionät användas på ett begränsat område. Dessa nät kommer att påverka varandra, dels kommer näten direkt kunna påverka (och potentiellt störa) varandra i radiospektrumet p.g.a. deras närhet, och dels kommer brigadens trafik i många lägen att behöva återsändas i flera nät för att nå alla avsedda mottagare, vilket kräver interaktion mellan näten. Detta delområde är dock brett med många utmaningar och inom projektet har enbart några frågeställningar undersökts.

Det tredje delområdet studerade möjliga framtida tekniker som kan ge stora förbättringar av kommunikationsmöjligheterna. Fokus har varit autonoma UAV:er som fungerar som stödnät för kommunikationen på marken. Ett sådant stödnät kan på grund av UAV:ernas upphöjda positioner ge ökad kapacitet och räckvidd, samtidigt som högre frekvensband kan användas vilket i sin tur möjliggör störundertryckning genom användande av adaptiva antenner. Till viss del kan UAV:erna också fungera som extra

sensorplattformar. Inom projektet har studier utförts kring hur ett sådant UAV-nät kan utformas för att stödja markförbandens kommunikation med nya förmågor, högre kapacitet och ökat störskydd.

De olika delarna av projektet beskrivs i efterföljande kapitel i termer av vilket arbete som genomförts tillsammans med de övergripande slutsatserna. I varje kapitel ges även referenser till publikationer innehåller utförligare beskrivningar och ytterligare detaljer.

En stor del av projektets arbete och resultat presenterades på en workshop som genomförts tillsammans med FoT-projektet *Flexibel frekvensanvändning för Försvarsmaktens radiosystem* (F4R) och som avrapporterades av det projektet i ett memo [2].

2 Synkroniserad kooperativ broadcast i smalbandiga nät

Smalbandig taktisk radio med bandbredder på 25 eller 50 kHz, som typiskt används inom VHF-bandet, har länge utgjort en viktig kommunikationsresurs för taktiska marknät. Det huvudsakliga användningsområdet har varit tal och normalt har ingen automatisk reläfunktionalitet använts. Genom att övergå till multihoppkommunikation på smalbandiga nät finns möjlighet att erhålla bättre yttäckning, ökat skydd mot störning samt bättre förmåga till att skicka data i tillägg till tal. Det huvudsakliga hindret för att använda multihopp i smalbandiga nät är den låga kapaciteten på länkarna i nätet. De protokoll som används för att hantera reläsändningar bör därför generera minimalt med overhead. Traditionellt använda protokoll som OLSR¹ uppfyller inte detta krav, däremot gör synkroniserad kooperativ broadcast (SKB) det. SKB är ett protokoll baserat på synkrona omsändningar som lämpar sig särskilt väl för effektiv vidareförmedling av multicast- och broadcasttrafik. Grundläggande kunskap om SKB underlättar förståelsen av detta kapitel. För grundläggande beskrivning av SKB hänvisas till [3, 4].

I det föregående FoT-projektet *Störskydd och smygförmåga i radionät* [4] påbörjades arbetet med att undersöka prestandan hos SKB för smalbandiga nät. En analys av prestandan för multihopp-tal presenterades i [1] som visade på stora vinster med att använda SKB i smalbandiga nät jämfört med traditionell enhoppskommunikation. Resultaten visade dessutom att det med SKB var möjligt att bibehålla ett förbundet nät med kraftigt reducerad uteffekt med hjälp av reläfunktionaliteten. Inom detta projekt har förbättringar till denna SKB-vågform tagits fram för att vidare öka kapaciteten i smalbandiga taktiska nät med fokus på datakommunikation. De tekniker som föreslås är användning av multipla kanaler samt utnyttjande av inkrementell redundans.

2.1 Användning av multipla kanaler

På sikt kommer ett stort antal nät behöva samexistera inom VHF-bandet. Schematiskt kan det ses som att radiokanalen delas in i ett raster i tid- och frekvensledd. En frekvenshoppkanal utgörs av en sekvens av frekvenshopp vars ordning bestäms av en kryptologisk nyckel. Olika nät använder olika nycklar och får därigenom olika *kanaler*. Med tekniker såsom ortogonala nät är det möjligt att koordinera många frekvenshoppande nät inom samma band kollisionsfritt. Icke-ideala filter i sändare kan dock begränsa hur pass nära i frekvensledd två nät kan hoppa utan att riskera att interferera med varandra genom utombandsstörning. En lösning är att införa skyddsavstånd mellan nät, det vill säga i ett givet tidsögonblick måste det finnas ett minsta antal tomma kanaler mellan två frekvenshoppande nät. Detta begränsar dock det totala antalet nät som kan samexistera inom ett givet frekvensområde.

Vidaresändningsalgoritmen i SKB har utökats så att sådana kanaler som normalt inte kan nyttjas på grund av utombandsstörning kan användas till vidaresändning med

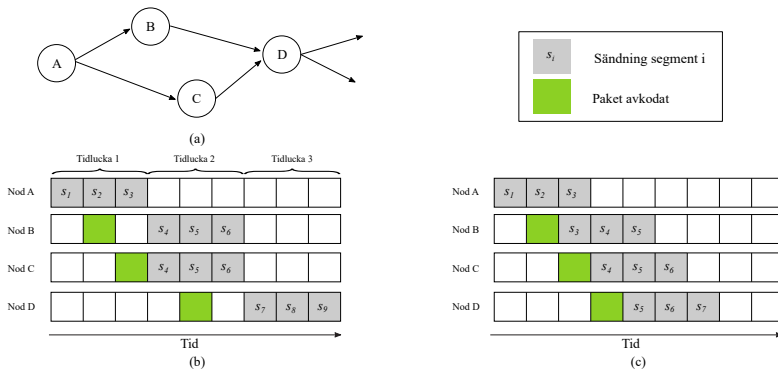
¹Optimized Link State Routing

väldigt liten störpåverkan. Tekniken bygger på att dela upp vidaresändningarna i SKB inte bara i tidsledd utan även i frekvensledd enligt ett schema som garanterar att noder som använder närliggande kanaler befinner sig på tillräckligt stort avstånd för att utombandsstörning ska ha minimal påverkan. Vi kallar denna lösning multi-kanal-SKB (MK-SKB). Användning av multipla frekvenskanaler i ett smalbandigt SKB-nät har analyserats och resultaten presenterades på MILCOM 2021 [5]. Genom att använda multipla kanaler i SKB kan kapaciteten i nätet ökas med 30–50% jämfört med att bara använda en kanal. Lösningen ställer dock krav på en mer avancerad mottagare och fördröjningarna ökar något. Vidare bygger kapacitetsvinsten på att det finns fria kanaler att utnyttja enligt vad som beskrivits ovan. Om så inte är fallet, är det svårt att hävda att lösningen ger en kapacitetsvinst jämfört med att köra SKB med ökad kanalbandbredd. Dock kan en utökning av kanalbandbredden vara svår att åstadkomma inom befintliga kanalaraster och då kan MK-SKB fortfarande vara en lösning för att skapa nät med högre kapacitet.

2.2 Inkrementell redundans

Taktiska smalbandiga nät använder typiskt frekvenshopp som störskydd. De datapaket som ska skickas i smalbandiga nät kan antas vara så pass stora att varje paket behöver sändas över ett antal frekvenshopp eftersom varje frekvenshopp bara överför en liten mängd data. Paketet delas därmed upp i ett antal, k , mindre segment som vardera ryms inom ett frekvenshopp. För att öka robustheten mot störning och fädning används en felrättande kod för att generera ett antal, l , ytterligare redundanta segment. Totalt sänds därmed $n = k + l$ segment på lika många frekvenshopp vid sändning av ett paket. Koden antas vara konstruerad sådan att en mottagande nod kan avkoda paketet om den tagit emot m segment, där $k \leq m \leq n$. Om den mottagande noden har en gynnsam kanal till sändaren krävs färre segment, medan det vid sämre kanalförhållanden krävs fler mottagna segment innan paketavkodning kan ske. Denna klass av koder kallas fontänkoder.

SKB har modifierats så att denna kodning över multipla frekvenshopp bättre utnyttjas i algoritmen som bestämmer när en nod reläer sändningar. I tidigare implementationer av SKB väntar mottagaren med att påbörja vidaresändning tills dess alla n segment mottagits, oavsett om avkodning skedde efter mottagning av ett mindre antal segment. I den förbättrade algoritmen, som kallas SKB med inkrementell redundans (SKB-IR), byter istället mottagaren från mottagning till sändning så fort ett tillräckligt antal segment avkodats. I Figur 2.1 ges ett exempel som visar skillnaden mellan normal SKB och SKB med inkrementell redundans. Förändringen innebär inte att vilket segment som skickas när ändras, men vilka noder som sänder i ett visst frekvenshopp kan ändras. Förändringen kan tyckas liten men visar sig ge stora förbättringar i antingen kapacitet eller robusthet beroende på hur det används. Ett konferensbidrag kring denna teknik presenterades på MILCOM 2022 [6].



Figur 2.1: Exempel på skillnaden mellan normal SKB och SKB med inkrementell redundans vid sändning av ett paket från nod A. I Figur (a) visas nättopologin. I (b) visas sändningsflödet för normal SKB och i (c) visas sändningsflödet för SKB med inkrementell redundans. I exemplet har alla noder tagit emot paketet efter ett mindre antal frekvenshopp då inkrementell redundans används. Det skulle därmed kunna vara möjligt att använda färre frekvenshopp per paketsändning och därigenom öka kapaciteten.

2.3 Slutsatser

SKB har tidigare visats vara en mycket effektiv teknik för multicast-trafik i taktiska bredbandiga nät. För smalbandiga taktiska nät visar genomförda arbeten att SKB ger liknande fördelar. Med de kapacitets- och robusthetsökande tekniker för SKB i smalbandiga nät som tagits fram inom projektet, användning av multipla kanaler och inkrementell redundans, kan effektiva vågformer designas som på ett robust vis hanterar både tal och data multihopp inom förband spridda över stora områden. Genom användning av SKB är det även möjligt att sänka uteffekten, något som kan utnyttjas för att minska upptäcktsrisken. Alternativt kan effektmarginalen ses som ett förbättrat störskydd eller ökad räckvidd.

3 Brigadkommunikation

Försvarsmakten kommer framöver använda större förbandsstrukturer som brigader och divisioner inom armén. Detta innebär att nya krav ställs på kommunikationslösningarna för att bidra till en effektiv ledning. Det finns ett antal frågeställningar att studera inom detta område och projektet har valt att fokusera på några av dessa.

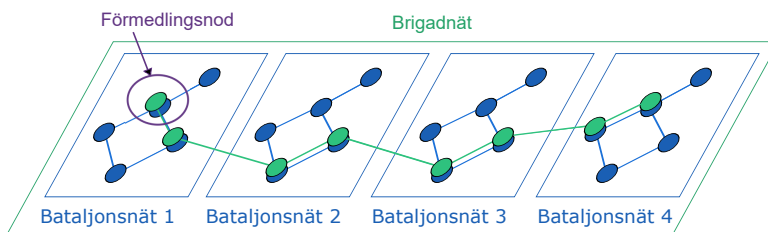
3.1 Positionsförmedling inom brigad

En studie av olika koncept för positionsförmedling inom en brigad har genomförts [7]. Då kravbilden rörande uppdateringstakt för positionsinformation kan antas vara högre för geografiskt närliggande förband än geografiskt avlägsna förband, fokuserade studien på metoder som kan understödja olika uppdateringstakt för olika förbandsdelar.

I studien antogs att en brigad består av fyra bataljoner och kommunikationen inom varje bataljon hanterades av var sitt bataljonsnät. Bataljonsnäten sammanbands sedan av ett brigadnät via förmedlingsnoder med dubbla radiostationer (figur 3.1). De fem näten antogs alla nyttja en SKB-baserad bredbandig vågform med en bandbredd på 1 MHz på UHF-bandet. Bataljonsnäten består av 100 noder vardera varav 15 noder även är med i det gemensamma brigadnätet som består av 60 noder.

I studien jämfördes två koncept, ett baserat på IP-multicast och ett baserat på applikationsrouting. I konceptet baserat på IP-multicast hanterar nätverkslagret vidareledning av paket mellan näten medan i konceptet baserat på applikationsrouting hanteras vidareledningar i stället på applikationslagret. Jämförelsen genomfördes genom simuleringar i nätssimulatorens *Aquarius*. Då den tänkta nätverksdesignen innehåller multipla förmedlingsnoder mellan respektive bataljonsnät och brigadnätet, bygger båda metoderna på att en mindre mängd lämpliga relänoder dynamiskt väljs ut som hanterar vidareledningar mellan näten.

För att stödja olika uppdateringstakt för positionsinformation i olika förbandsdelar nyttjar konceptet baserat på IP-multicast ett antal multicastgrupper. I konceptet baserat på applikations-routing åstadkoms olika uppdateringstakter genom att de utvalda förmedlingsnoderna filtrerar informationen. För enkla uppdateringsmönster är båda koncepten funktionella. Om mer avancerade uppdateringsmönster önskas, till exempelvis



Figur 3.1: Illustration av ett brigadnät som sammanbinder fyra bataljonsnät via förmedlingsnoder.

att närliggande bataljoner uppdateras oftare än mer avlägsna, bedöms dock konceptet baserat på applikationsrouting vara lättare att generalisera.

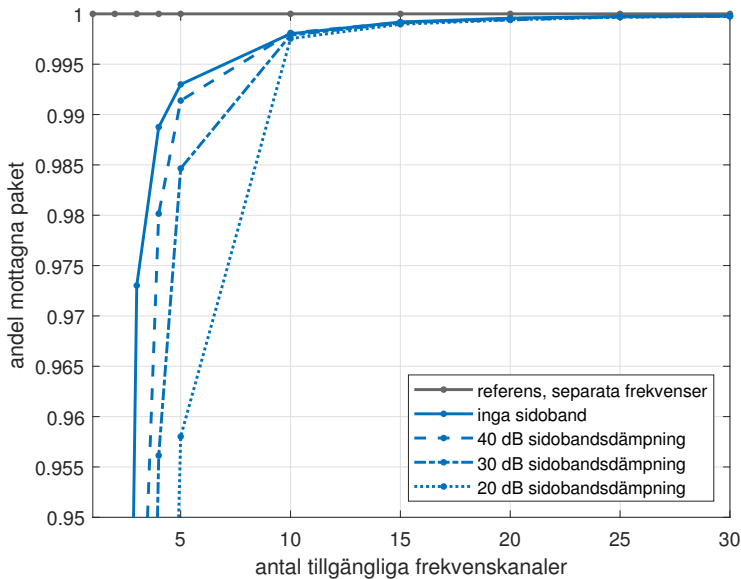
Ytterligare en fördel med konceptet baserat på applikationsrouting är dess stöd för dataaggregering i förmedlingsnoderna. Vid aggregeringen sätts positionsdata från flera noder tillhörande ett bataljonsnät samman till ett stort meddelande innan det sänds vidare via brigadnätet. Då datamängden i ett enskilt positionsmeddelande är relativt liten sett till den kontrolldata som de underliggande protokollen lägger på varje paket, ger aggregering lägre trafiklast.

3.2 Samutnyttjande av frekvenser mellan nät

Frekvenstillgången på UHF-bandet kan i många fall vara begränsad. Då flera frekvenshoppande bredbandiga bataljonsnät ska användas samtidigt inom en brigad är det därför önskvärt att dessa kan tilldelas samma frekvenskanaler. Detta skulle möjliggöra att näten tilldelas fler frekvenskanaler, vilket skulle kunna ge bättre skydd mot störning eller andra externa interferenser samt underlätta frekvensplanering. Samutnyttjande av frekvenser kan dock vara problematiskt om flera nät befinner sig såpass nära varandra att de riskerar att interferera över radiokanalen.

I [8] redovisas resultat från simuleringar genomförda med nätsimulatorens *Aquarius*. I studien analyseras påverkan av interferenserna som uppstår då två bataljonsnät med frekvenshoppande bredbandiga SKB-vågformer antas nyttja samma uppsättning frekvenser på UHF-bandet. Enbart fallet då de nät som samutnyttjar frekvenser ej används på samma plattform studerades. (Fallet med flera nät på samma plattform, exempelvis plattformar med både bataljon- och brigadnät, är en svårare utmaning.) Nätsimuleringar av två scenarier har undersökts: ett då en bataljon avlöser en annan bataljon i deras stridsställning och ett med en utsträckt bataljon intill en tätare grupperad bataljon. Scenarierna som använts har med avsikt gjorts svåra: maximal trafiklast, icke-ideala utombandsegenskaper hos vågformen och noderna i de båda näten har placerats relativt nära varandra.

Trots de utmanade scenarierna, visar studien att med tillgång till tillräckligt många frekvenskanaler ges en låg inverkan på näten, sett till andelen paket som tas emot korrekt. Figur 3.2 visar ett exempel på resultat från scenariot då en bataljon avlöser en annan bataljon i deras stridsställning. I figuren visas andelen mottagna paket för det kompani med sämst utfall, för olika antal tillgängliga frekvenskanaler. Kurvorna motsvarar några olika värden på sidobandsdämpning (hög sidobandsdämpning motsvarar bra utombandsegenskaper). I de fall där andelen mottagna paket inte påverkas kan dock ändå näten påverkas genom att fler reläsändningar behöver nyttjas för att leverera pake-ten till alla mottagare. Detta skulle kunna ses som att en del av vågformens robusthet förbrukas vilket ger en negativ påverkan på störskyddet. Att samutnyttja frekvenser mellan flera nät bör dock i sin tur möjliggöra att fler frekvenser kan nyttjas till varje nät, vilket i många fall påverkar störskyddet i positiv riktning.



Figur 3.2: Andel mottagna paket för det kompani med sämst utfall, för olika antal tillgängliga frekvenskanaler. Tidförskjutning mellan de två bataljonsnäten är här 0,3-CB-slottlängden.

3.3 Deltagande i Nato-gruppen STO IST-161

FOI har deltagit i Nato-gruppen NATO-STO IST-161(COM) *Efficient Group and Information Centric Communications in Mobile Military Heterogeneous Networks*, som har undersökt möjliga lösningar för gruppkommunikation i mobila taktiska nät, med fokus på den infrastruktur som behövs för att stödja användarapplikationer. Målet var att förbättra förståelsen för utformningen av gruppkommunikationslösningar och deras beteende. Ett sekundärt mål var att undersöka nya tekniker för gruppkommunikation såsom *Information Centric Networking (ICN)* och i synnerhet *Named Data Networking (NDN)*. Gruppen jämförde befintliga lösningar, identifierade fördelarna med dessa lösningar och identifierade och implementerade förbättringar.

För utvärderingarna har ett flertal protokoll jämförts i en emuleringsmiljö, i vilken protokollens mjukvara kan installeras och testas under realistiska förhållanden. En begränsning med emulering, jämfört med simulering, är att det kan vara svårt att utvärdera stora nät i en emuleringsmiljö. Protokollen baseras på olika principer och tekniker, till exempel ett mellanlager (mellan TCP/UDP och applikationen), innehållsbaserad hantering av data, samt centraliserade och distribuerade lösningar. En fördel med ett mellanlager är enklare applikationer, genom att gemensam funktionalitet för gruppkommunikationen stöds av mellanlagret. Eftersom applikationer måste anpassas för att utnyttja fördelarna med tekniken, ligger tillämpningar av resultaten några år framåt i tiden.

Av de undersökta protokollen är GDEM¹ och DisService² särskilt intressanta för vidare studier. De visade sig fungera bäst i emuleringsmiljön med avseende på robusthet och overhead för det undersökta scenariot. Mer detaljerade resultat finns i de publikationer som Nato-gruppen tagit fram [9, 10, 11, 12, 13] samt i ett sammanfattande FOI memo [14].

Förutom kunskapsuppbyggnad är ett syfte med att delta i internationella samarbeten att få kontakter och ökad insyn i andras forskningsverksamhet och prioriteringar. En erfarenhet från arbetet är att de deltagande organisationerna har olika syn på kommunikationsbehov och arkitekturlösningar för taktiska nät. Samarbetet i gruppen har fungerat väl (särskilt med tanke på att deltagarnas arbete sker med egen finansiering), med gemensamma konferensbidrag och MILCOM-paneler.

¹Ett proprietärt protokoll utvecklat av TNO, baserat på Joint Dismounted Soldier System Information Exchange Mechanism (JDSS-IEM) som specificeras i STANAG-4677

²Öppet protokoll från Institute for Human & Machine Cognition (IHMC), Florida

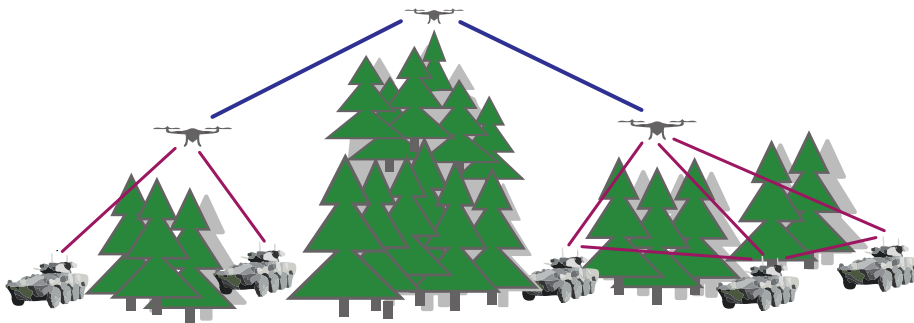
4 UAV-stödd radiokommunikation i mobila marknät

Teknikutvecklingen av obemannade flygande farkoster, UAV:er, karaktäriseras av autonomitet, ökande prestanda och sjunkande pris. Därför kan UAV:er som oberoende av operatörer på marken följer markfordonen vara en användbar komponent i mobilt marknät, till exempel en mekaniserad bataljon. Att utöka det mobila marknätet med UAV:er kan ge en väsentligt ökad kommunikationskapacitet i ett förband. Eftersom flygande reläknoder kan ha fri sikt till varandra, så kan de ha längre länkar med hög kapacitet jämfört med länkarna mellan markfordonen. Längre avstånd inom nätet kan överbryggas om länkarna mellan UAV:erna har fri sikt ovanför besvärlig terräng, samtidigt som avstånden från UAV:n till marken kan hållas relativt korta så att signalen är tillräckligt stark för att ta sig genom mellanliggande vegetation ner till markfordonet.

4.1 Konceptbeskrivning

Ett koncept för UAV-stödd kommunikation har tagits fram och utvärderats, i vilken lågt flygande autonoma UAV:er följer ett markförband. UAV:erna bildar ett förbundet luftburet nät och varje markfordon har förbindelse med minst en UAV (figur 4.1). I konceptet fördelar sig UAV:erna autonomt över markfordonen på ett lämpligt sätt och flyger tillräckligt lågt för att undgå radar och visuell upptäckt. Dessutom antas att de vid behov, till exempel i kuperad terräng, placerar sig så att det flygande nätet inte fragmenteras. Ett luftburet nät kan använda högre frekvenser än dagens markbundna nät, eftersom länkarna mellan UAV:erna har fri sikt och behovet av räckvidd mellan markfordonen minskar. Därmed kan också kapaciteten ökas och målet med konceptet är att öka kapaciteten betydligt, åtminstone en tiopotens högre än de bredbandiga taktiska vågformer som används idag.

Det tänkta konceptet beskrivs i [15]. Rapporten innehåller även en litteraturstudie



Figur 4.1: Lågt flygande autonoma UAV:er bildar ett kommunikationsnät med hög kapacitet. Länkar mellan UAV:er antas ha fri sikt.

kring vad som tidigare publicerats och är relevant för att realisera konceptet. Områdena för litteraturstudien innefattade: kanalmodellering, frekvensval och antenner, olika typer av kommunikationsnät med UAV:er, samt UAV som flygande basstation. Även en bedömning av framtida UAV-prestanda genomfördes. Sammantaget har litteraturstudien identifierat intressanta delområden som behöver studeras vidare för att kunna realisera konceptet, så som kanalmodellering för dessa typer av nät samt vilken typ av nätverksarkitekturer som är lämplig. Några direkta lösningar för att realisera konceptet upptäcktes inte, men inte heller något som talar emot konceptet.

4.2 Förutsättningar för konceptet

Analys av potentiella frekvensband för kommunikation mellan lågtflygande UAV:er och markfordon finns rapporterat i [16, 17]. I dessa studier genomfördes mätningar av länkdämpning genom skog och statistiska analyser av radoräckvidden på L-bandet för olika terrängtyper. Beräkningar av räckvidder för ett systemexempel visar att transmissionsförlusten mellan markfordon och UAV är tillräckligt låg vid frekvenser upp till 1,5–2,5 GHz, men för de högre frekvenserna krävs riktantenner och högre UAV-höjder.

En analys av möjliga nätverksarkitekturer för konceptet under bivillkoret att den mesta trafiken är broadcast till hela nätet presenteras i [18]. Tre konceptlösningar beskrivs. Den minst komplexa och enklast att använda i initiala analyser är en lösning med ett gemensamt mark- och luftenät i vilket samtliga noder använder samma frekvens. UAV:erna kan då hanteras på samma sätt som marknoderna.

Ett väsentligt krav på konceptet är att en bataljon bestående av upp till omkring två hundra fordon bör kunna stödjas med ett måttligt antal autonoma UAV:er, kanske en UAV per kompani eller en per pluton. För att undersöka detta gjordes en täckningsanalys för ett UAV-stöttat marknät, [19]. Undersökningen baserades på ögonblick av positionerna för en mekaniserad bataljon bestående av 157 fordon. Både marknoder och UAV:er antogs använda samma bärvågsfrekvens, 1,5 GHz. Resultaten visar att antalet UAV:er som behövs motsvarar ungefär en tiondel av antalet marknoder.

4.3 Upptäcktsavstånd

Signalspanare gynnas av UAV:ernas upphöjda position och det är viktigt att den ökade datatakten inte kommer på bekostnad av en signifikant högre upptäcktsrisk. Detektionsavståndet för markbaserade signalspanare som spanar mot UAV-nätet har uppskattats med hjälp av länkberäkningar. I [20] undersöktes hur flyghöjden påverkar upptäcktsavståndet samt hur upptäcktsavstånden för UAV-nätet (på 1,5 GHz) förhåller sig till upptäcktsavstånden för ett traditionellt markbaserat UHF-nät på 300 MHz. Resultaten tyder på att dessa avstånd är jämförbara, givet att UAV:erna kan flyga lågt, helst kring 30 meter.

4.4 Slutsatser och fortsatt arbete

Ett koncept med stöttande UAV:er för tiofaldigt ökad kapacitet i mobila marknät har undersökts. I de analyser som genomförts har inga hinder för konceptidén upptäckts.

För fortsatta genomförbarhetstester av konceptet behövs exempel på utplaceringsalgoritmer för autonom följning av markfordonen över tid. Helst ska en sådan utplacering ta hänsyn till terrängen och utnyttja lägen som ger låg länkdämpning. Vidare måste hänsyn tas till att luften inte ska fragmenteras, vilket annars kan inträffa om markfordonen är för utspridda.

I GHz-området kan adaptiva antenner användas för högre kapacitet och störåtlighet. Detta är intressant att undersöka, i första hand för UAV:erna vid mottagning, men även för övriga fall. Ett annat område som behöver fortsatt arbete är att undersöka robusthet mot aktiva störare.

5 Sammanfattande slutsatser

Denna rapport sammanfattar arbetet som utförts i projektet *Radionät för markförband*. Projektets mål har varit att utveckla kunskap till stöd för Försvarsmaktens förmågeutveckling inom robust trådlös kommunikation för markförband. Detta är ett brett område så ett antal delområden har valts ut och frågeställningar inom dessa har undersökts. Nedan beskrivs några av de viktigaste slutsatserna.

Synkroniserad kooperativ broadcast (SKB) visar sig ge samma fördelar vinster i smalbandiga nät som bredbandiga nät. Med de tekniker som utvecklats inom projektet för smalbandig SKB, såsom inkrementell redundans och samtidig användning av multipla kanaler, kan effektivare smalbandiga vågformer tas fram.

Då frekvenstillgången på UHF-bandet är begränsad är det önskvärt att flera bredbandiga nät kan tilldelas en gemensam uppsättning frekvenser. Detta riskerar dock att skapa interferenser mellan näten för vissa scenarier då näten är nära varandra. Analyser av ett par, ur denna synvinkel, svåra scenarier visar dock att så länge systemet konfigureras med tillräckligt många frekvenskanaler blir påverkan på paketmottagningen i näten relativt liten.

Ett koncept har utvecklats i vilket UAV:er stöttar ett mobilt marknät med målet att tiodubbla kapaciteten i nätet. I de analyser som genomförts har inga uppenbara hinder för att realisera konceptidén upptäckts, men diverse tekniker runt konceptet behöver förbättras för att det ska vara praktiskt i verkliga scenarier. Ett viktigt exempel på detta är utplaceringsalgoritmer för att UAV:erna autonomt ska följa markfordonen över tid.

Referenser

- [1] A. Komulainen, J. Grönkvist, U. Sterner och U. Uppman, "Improving tactical voice communications using cooperative broadcast over a narrowband channel," *MILCOM 2019 IEEE Military Communications Conference*, 2019, s. 514–520.
- [2] P. Eliardsson, "Redovisning av genomförd workshop inom FoT-projektet flexibel frekvensanvändning för Försvarsmaktens radiosystem (F4R)," FOI, Linköping, Sverige, FOI Memo 8267, dec. 2023.
- [3] J. Grönkvist, A. Komulainen, A. Hansson och U. Uppman, "Tillförlitlig informationsöverföring i mobila radionät - Slutrapport," FOI, Linköping, Sverige, FOI-R--4475--SE, dec. 2017.
- [4] —, "Störskydd och smygförmåga i radionät - Slutrapport," FOI, Linköping, Sverige, FOI-R--5078--SE, jan. 2021.
- [5] A. Komulainen, J. Grönkvist och U. Sterner, "Multi-channel cooperative broadcast for narrowband tactical networks," *MILCOM 2021 IEEE Military Communications Conference*, 2021, s. 696–702.
- [6] —, "Frequency-hop-coded SCB for tactical networks," *MILCOM 2022 IEEE Military Communications Conference*, 2022, s. 247–252.
- [7] J. Olsson, "Dissemination of geographic location data in low bandwidth radio networks," Luleå tekniska universitet, Luleå, Sverige, Scientific Report, juni 2023.
- [8] U. Uppman, "Samutnyttjande av frekvenser mellan flera bredbandiga bataljonsnät – Simulering och analys av SKB-baserade radionät," FOI, Linköping, Sverige, FOI-R--5520--SE, nov. 2023.
- [9] K. Marcus *et al.*, "Emulating synchronized cooperative broadcast in the Anglova scenario and EMANE," *2020 Military Communications and Information Systems Conference (MilCIS)*, 2020.
- [10] N. Suri *et al.*, "Evaluating the scalability of group communication protocols over synchronized cooperative broadcast," *2021 International Conference on Military Communication and Information Systems (ICMCIS)*, 2021.
- [11] M. Tortonesi *et al.*, "Evaluating the impact of jamming on group communication protocols in tactical environments," *MILCOM 2021 IEEE Military Communications Conference*, 2021.
- [12] N. Suri *et al.*, "To forward or not to forward: Considerations on and experiments with network layer forwarding in combination with middleware services for group communications," *Procedia Computer Science*, vol. 205, s. 78–87, 2022, 2022 International Conference on Military Communication and Information Systems (ICMCIS).

- [13] C. Barz *et al.*, “IST-161 Final Report, Efficient group and information centric communications in mobile military heterogeneous networks,” NATO Science and Technology Organisation Collaboration Support Office, Technical Report RDP STO-TR-IST-161, dec. 2023.
- [14] A. Hansson och J. Nilsson, “Erfarenheter och slutsatser av arbetet i NATO-gruppen STO IST-161,” FOI, Linköping, Sverige, FOI Memo 8259, nov. 2023.
- [15] G. Bark, J. Grönkvist, A. Hansson, K. Hägglund, A. Komulainen och J. Rydell, “Autonoma UAV:er för kraftigt ökad kapacitet i mobila taktiska nät,” FOI, Linköping, Sverige, FOI-R--5196--SE, okt. 2021.
- [16] G. Eriksson, P. Holm och A. Hansson, “Räckviddsanalys för mobila taktiska kommunikationssystem på L-bandet,” FOI, Linköping, Sverige, FOI-R--4733--SE, dec. 2019.
- [17] G. Eriksson, A. Hansson, P. Holm och J. Grönkvist, “Vågutbredningsanalys för UAV-stöd i taktiska mobila radionät,” FOI, Linköping, Sverige, FOI-R--4734--SE, dec. 2019.
- [18] J. Grönkvist, “Kommunikationsarkitektur för lågflygande UAV-nät,” FOI, Linköping, Sverige, FOI-D--1255--SE, dec. 2023.
- [19] J. Grönkvist, A. Hansson, K. Hägglund, A. Komulainen och M. Sköld, “Low-altitude UAVs for significantly increased data rate in tactical ad hoc networks,” *Procedia Computer Science*, vol. 205, 2022, International Conference on Military Communication and Information Systems (ICMCIS).
- [20] A. Komulainen, “Upptäcktsavstånd för lågtflygande UAV-nät,” FOI, Linköping, Sverige, FOI-R--5339--SE, okt. 2022.

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