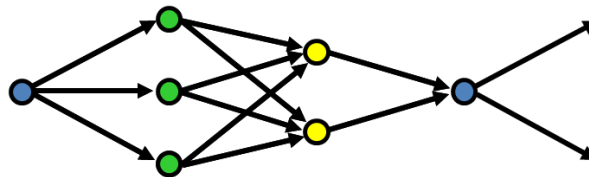


JIMMI GRÖNKVIST, JAN NILSSON, ANDERS HANSSON,  
GUNNAR ERIKSSON, SARA LINDER OCH ARWID KOMULAINEN





Jimmi Grönkvist, Jan Nilsson, Anders Hansson,  
Gunnar Eriksson, Sara Linder och Arwid Komulainen

# Dynamisk resurshantering i taktiska nät

Slutrapport

FOI-R--3967--SE

Titel	Dynamisk resurshandling i taktiska nät – Slutrapport
Title	Dynamic Resource Management in Tactical Networks – Final Report
Rapportnr / Report No.	FOI-R--3967--SE
Månad / Month	December / December
Utgivningsår / Year	2014
Antal sidor / Pages	23
ISSN	1650-1942
Kund / Customer	FM
Forskningsområde	4. Informationssäkerhet och kommunikation
FoT område	Ledning och MSI
Projektnr / Project No.	E36055
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

Denna rapport sammanfattar det arbete som utförts i projektet "Dynamisk Resurshandtering i taktiska nät".

Syftet med projektet har varit att ta fram metoder för att utnyttja de tillgängliga kommunikationsresurserna i taktiska multihop-nät så effektivt som möjligt samtidigt som dynamiken orsakad av i första hand mobilitet hanteras.

Projektet har studerat frågeställningar om hur multicasttjänster i ad hoc-nät kan hanteras. Resultaten pekar på att synkroniserad kooperativ broadcast (SKB) verkar vara den effektivaste lösningen i många fall. SKB tenderar att ge korta fördröjningar och möjliggör enkel köprioritering mellan tjänster och kan på sikt utvidgas till att utnyttja mer avancerade länktekniker för att ytterligare öka kapaciteten.

Det finns dock en del kvarvarande utmaningar med SKB som behöver studeras ytterligare.

Nyckelord: ad hoc-nät, kooperativ kommunikation

## **Abstract**

This report summarize the works that has been done in the project “Dynamic resource management in tactical networks”.

The objective of the project is to find methods and algorithms to use the available communication resources as efficient as possible in military multi-hop networks while handling the dynamics induced by mobility.

The project has primarily studied how multicast services in ad hoc networks should be handled and concluded that synchronized cooperative broadcasting seems to be the most efficient technology in many cases. Using cooperative broadcasting has small delays and allows for easy queue handling in the source nodes and can be expanded to easily exploit more advanced link technologies to further increase capacity.

There are, however, still challenges with the technique that needs further studies.

Keywords: Ad hoc networks, cooperative communication

## Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>7</b>
1.1	Introduktion till taktiska radionät . . . . .	7
1.2	Frågeställningar för projektet . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Sammanfattning av projektet</b>	<b>9</b>
2.1	Scenarier . . . . .	9
2.2	Distribuerad TDMA . . . . .	9
2.3	Datataktval i ad hoc-nät . . . . .	10
2.4	Adaption delay . . . . .	10
2.5	Synkroniserad kooperativ broadcast . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Synkroniserad Kooperativ Broadcast</b>	<b>13</b>
3.1	Variabel datatakt . . . . .	14
3.2	Återutsändningsavstånd . . . . .	15
3.3	Jämförelse mellan SKB och TDMA . . . . .	16
3.4	Utvärdering av kooperativ reläteknik . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>21</b>
	<b>Referenser</b>	<b>23</b>

FOI-R--3967--SE



# 1 Inledning

Denna rapport sammanfattar arbetet som utförts i projektet “Dynamisk resurshantering i taktiska nät”. Projektet har varit ett treårigt projekt inom ramen för Forsvarsmaktens samlingsbeställning FoT (Forsvarsmaktens Forskning och Teknikutveckling) och har genomförts 2012-2014.

## 1.1 Introduktion till taktiska radionät

Kapacitetskraven på de militära radiokommunikationssystemen förutsätts att öka de närmaste åren samtidigt som traditionella krav på robusthet, tillförlitlighet och i många fall lång räckvidd fortfarande är mycket viktiga. Militära kommunikationssystem måste dessutom kunna fungera oberoende av tillgängligheten av fast infrastruktur. Dessa krav gör att direkt användning av civil teknik ofta inte är möjlig utan speciella militära radiosystem är nödvändiga, med mer begränsad kapacitet än vad som motsvarande civila system skulle ha. I många fall kan detta innebära att kvaliteten på vissa tjänster och applikationer kommer vara svåra att upprätthålla. Det är därför nödvändigt att utnyttja de begränsade resurser som finns tillgängliga för ett taktiskt radionät så bra som möjligt samtidigt som viktig trafik måste kunna prioriteras.

## 1.2 Frågeställningar för projektet

Syftet med projektet har varit att ta fram metoder för att utnyttja de tillgängliga kommunikationsresurserna så effektivt som möjligt samtidigt som dynamiken i de mobila radionäten hanteras. Fokus har varit systemet som helhet och inte enskilda komponenter och funktioner. Den övergripande frågeställningen för projektet har varit hur kommunikationsresurserna ska fördelas för att kunna realisera alla de taktiska tjänster som är nödvändiga för användarna.

Problemställningen som projektet arbetat med är hur hanteringen av multicasttrafik (kommunikation från en till flera) ska ske, eftersom detta är en vital del i militära kommunikationssystem. I de flesta existerande civila system, och många militära system, är multicast-hantering antingen inte en prioriterad funktion eller löses den på ett ineffektivt sätt (framför allt för de bandbredds begränsade radionäten som är aktuella i detta projekt).

Frågeställningar som projektet har försökt besvara är:

- *Hur ska multicasttjänster hanteras på ett effektivt sätt i radionätet?* Synkroniserad kooperativ broadcast (SKB) verkar vara den effektivaste lösningen att hantera denna typ av trafik vilket identifierats inom projektet. SKB med prestanda beskrivs närmare i Kapitel 3.
- *Hur ska tjänster med olika prioritet och fördröjningskrav hanteras?* SKB tenderar att ge korta fördröjningar och möjliggör enkel köprioritering mellan tjänster redan i källnoden (Kapitel 3).
- *Hur ska radionätet utnyttja avancerade adaptiva länktekniker (t.ex. adaptiv kod-*

*ning och modulation, MIMO, OFDM, och hybrid-ARQ) på ett effektivt sätt? Genom att lägga till granskapsinformation i nätprotokollen, kan även mer avancerade länktekniker hanteras i SKB-nät (Avsnitt 3.1).*

- *Vilka modifieringar behövs av länkteknikerna och nätprotokollen för att de ska kunna fungera ihop? Ovan nämnda granskapsinformation är en nödvändig förändring av nätprotokollen. Länktekniker behöver anpassas så att den ökande flervägsutbredningen av SKB hanteras (Avsnitt 3.1).*

## 2 Sammanfattning av projektet

Detta kapitel sammanfattar projektets resultat och ger samtidigt ett sammandrag av kapitel 3, som innehåller fördjupad information om några av projektets problemområden.

### 2.1 Scenarier

En sammanställning över scenarier som tagits fram i olika verksamheter där FOI varit delaktiga skrevs under våren 2012. Syftet var att identifiera några scenarier som beskriver taktiskt relevanta och ur ett kommunikationsperspektiv intressanta fall. Dessa scenarier skulle ge användarna en förståelse för vilka problem som avsågs att studeras i projektet och har även senare användas för att redovisa resultat från projektet.

Dessa scenarier presenterades på en workshop som projektet anordnade 2012-05-15 på markstridsskolan i Skövde. De olika scenarierna diskuterades med försvarsmaktspersonal för att avgöra taktisk relevans idag. Detta arbete har vidareutvecklats i en rapport som innehåller en sammanställning av scenarier [1], för fordonsburen taktisk radiokommunikation, som under de senaste 10-15 åren tagits fram, i studier där FOI varit delaktig.

### 2.2 Distribuerad TDMA

För att ett radionät ska kunna tillgodogöra sig dynamiska länktekniker och hantera multicast-trafik måste access-protokollet, som styr hur de tillgängliga resurserna fördelas mellan noderna i nätet, hantera detta effektivt. Trafikbelastningen och kapaciteten på länkarna kommer att variera relativt snabbt och accessprotokollet måste därför snabbt omfördela resurserna till de noder/länkar som för tillfället behöver dem bäst (beroende på t ex prioritet).

Inom militära tillämpningar är majoriteten av systemen TDMA-baserade (Time division multiple access), några exempel på TDMA-baserade vågformer finns inom GTRS och ESSOR [2]. Det finns flera anledningar till att TDMA-baserade lösningar är att föredra i militära tillämpningar, bland annat för att de erbjuder predikterbara fördröjningar och bättre skalbarhet. Ett alternativ till TDMA är CSMA (carrier sense multiple access). Ett problem med CSMA-baserade lösningar är att antalet kollisioner ökar när trafiklasten ökar, vilket är fallet i synnerhet för broadcast- och multicast-trafik.

Inom projektet har en litteraturstudie genomförts över de algoritmer för TDMA som finns presenterade och utvärderat hur väl de uppfyller de egenskaper som krävs i militära scenarion. I litteraturstudien har vi inte funnit något protokoll som har alla de egenskaper som krävs, i synnerhet är många av de lösningar som presenteras centraliserade.

Nästa del i arbetet har därför bestått i att vidareutveckla och implementera en egenhändigt framtagen TDMA-algoritm, som är designad för att möta de krav som ställs i ett militärt scenario. Resultatet är en helt distribuerad, trafik-adaptiv TDMA-algoritm som klarar av att hantera avancerade länkestimat. Ett viktigt användningsområde för den framtagna TDMA-algoritmen är som måttstock mot vilken tilltänkta systemlös-

ningar kan jämföras mot, så som exempelvis Synkroniserad Kooperativ Broadcast (SKB), se Avsnitt 3. Litteraturstudien samt en utförlig beskrivning av den framtagna TDMA-algoritmen finns beskrivet i [3].

## 2.3 Datataktval i ad hoc-nät

Olika avancerade länktekniker, exempelvis adaptiv kodning och modulation, MIMO, OFDM, och hybrid-ARQ, är lösningar som används allt mer i civila system för att öka kapaciteten i radiosystem. I de flesta fall leder detta dock till variabla länkkapaciteter över tiden, ibland högre och ibland lägre. Det är dock inte självklart att länkar med hög datatakt ska användas i så hög grad som möjligt då trafiken skickas från en sändare till många mottagare eftersom höga datatakt normalt leder till lägre räckvidder och därmed nås färre mottagare. Hur ska datatakterna väljas och vilken multicastroting är effektiv då datatakterna varierar i nätet?

En aktivitet inom projektet, som byggt vidare på aktiviteter utförda inom det tidigare KomStril-projektet, har undersökt detta. Arbetet har publicerats som en artikel i IET Communication [4]. Artikelns undersöker hur lämpliga datatakt ska väljas för broadcast-trafik i ett ad hoc-nät.

Från detta arbete kan vi konstatera att införande av variabel datatakt för multicast-trafik i mobila radionät är svårt och inga bra lösningar finns. Utan sådana lösningar kommer de avancerade länkteknikerna nämnda ovan inte ge så höga vinster som man annars skulle kunna förvänta sig.

## 2.4 Adaption delay

Taktiska ad hoc-nät är dynamiska vilket innebär att de hela tiden kan behöva anpassa sig till en föränderlig situation och miljö. Både topologi och trafikförändringar kan kräva att protokoll uppdateras. Hur olika applikationer påverkas av tiden det tar att uppdatera protokollen i TDMA-baserade nät har undersökts inom projektet. Detta är en vidareutveckling av resultat som tagits fram inom det tidigare KomStril-projektet. Resultaten har projektet presenterat i ett konferensbidrag [5] på konferensen MedHocNet 2012 (20-22 juni, Ayia Napa, Cypern).

Resultaten visar att adaptionstiden för protokollen behöver vara flera gånger kortare än fördröjningskraven på applikationerna för att erhålla en hög kapacitet i nätet.

Från detta arbete kan det konstateras att applikationer med hårda fördröjningskrav förmodligen behöver hanteras på ett annorlunda sätt i TDMA-baserade (smalbandiga) ad hoc-nät än bulk-data som inte har så hårda krav. Framförallt kommer bara en liten del av den totala kapaciteten i nätet att kunna användas för trafik med hårda fördröjningskrav, denna del behöver förmodligen också reserveras i förväg.

## 2.5 Synkroniserad kooperativ broadcast

En stor del av projektarbetet har varit att utvärdera Synkroniserad Kooperativ Broadcast. SKB kan ses som ett tekniksprång för att förmedla broadcast-trafik i ad hoc-nät

som har potential att förbättra kommunikationsmöjligheterna för användarna i taktiska nät. Jämfört med klassiska ad hoc-nätstekniker har SKB flera positiva egenskaper:

- SKB är i stort sett okänslig för mobilitet
- Små garanterade fördröjningar över multipla hopp, vilket är specifikt intressant för tal
- Potentiellt betydligt högre kapacitet för broadcast-trafik

Dessa egenskaper, plus fler som diskuteras i följande kapitel, gör att SKB ses som en potentiell lösning på de frågor projektet har valt att undersöka.

En användarrapport som beskriver SKB med dess fördelar och nackdelar har skrivits [6], se följande kapitel för utdrag ur denna rapport.

Prestandautvärderingar och arbeteten med olika tekniker för att förbättra SKB har gjorts inom projektet och beskrivs närmare i kapitel 3.

FOI-R--3967--SE

### 3 Synkroniserad Kooperativ Broadcast

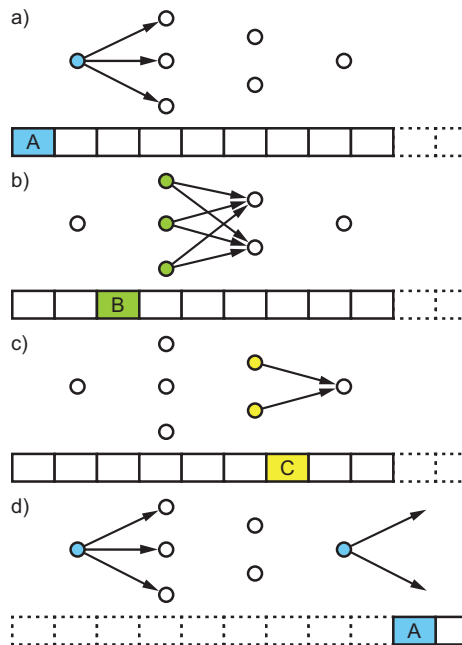
Ett enkelt och robust sätt att sända broadcast-trafik är via flödning, det vill säga alla noder i nätet återutsänder alla mottagna paket. Nackdelen är att flödning genererar onödigt mycket trafik i nätet. Synkroniserad kooperativ broadcast (SKB) är en alternativ teknik som är effektivare, men ändå har jämförbar robusthet. Med kooperativ kommunikation avses i denna rapport att en nod samtidigt kan ta emot meddelanden som är sända från flera olika noder. För att det ska fungera behöver dock meddelanden sändas så att de kan tas emot ungefär samtidigt, det vill säga sändningarna behöver vara synkroniserade. Åtminstone en leverantör säljer radiosystem som använder sig av synkroniserad kooperativ broadcast. Företaget TrellisWare Technologies, Inc., som ligger bakom tekniken BRN (barrage relay networks) säljer en familj av radiosystem som går under namnet "CheetahNet".

För att beskriva de grundläggande principerna bakom SKB antar vi att nätet är synkroniserat och har en tidluckestruktur, dvs. det är ett TDMA-nät i grunden. Detta är dock inte nödvändigt för att tekniken ska fungera, i alla fall inte för små nät med korta utbredningstider. I synkroniserad kooperativ broadcast används sedan kooperativ sändning, vilket innebär att flera sändares information kan läggas samman för att förbättra mottagarens möjlighet att ta emot ett meddelande. Detta kräver en mottagare som konstruktivt kan lägga ihop flera mottagna signaler, samma mekanism som används vid flervägsutbredning. Kombinerar vi nu detta med en tidluckestruktur så att alla noder återsänder informationen samtidigt (synkront) så kan en effektiv broadcast åstadkommas. Notera att det är samma paket som återutsänds från olika noder vid en given tidpunkt.

Vi illustrerar synkroniserad kooperativ broadcast enklast med ett exempel bestående av fyra olika faser (a)-(d), se Figur 3.1. I fas (a) sänder en källa (vänstra blå noden) ett paket i tidlucka A. I fas (b) återutsänds paketet av alla noder (gröna noderna) som kunde ta emot paketet i fas a). Återutsändningen sker i en och samma tidlucka B. I fas c) återutsänds paketet i en senare tidlucka C av grannarna till de gröna noderna (de gula noderna). Det ursprungliga paketet når nu en nod som ligger på avstånd tre-hopp från källnoden (noden längst till höger). Denna nod kan återutsända paketet vidare i nätet i tidlucka A i nästa ram av tidluckor samtidigt som den ursprungliga källnoden då sänder ett nytt paket i samma tidlucka, se fas (d) i Figur 3.1.

I fas (b) kommer alla mottagare på två radiohops avstånd från källan att ta emot paketet från flera sändare nästan samtidigt. Mottagarna måste hantera skillnader i utbredningstiderna plus eventuella skillnader i synkroniseringen. Mottagarnas förmåga att lägga samman paket från flera sändande noder ger en robust mottagning som inte är beroende av några enskilda noder. En nod som tar emot i tidlucka B kommer inte i förväg behöva veta vilka som sänder i denna, eller hur många de är.

Synkroniserad kooperativ broadcast är speciellt lämpad, och också i första hand utvecklad, för push-to-talk-taltrafik (PTT). I det fallet reserveras tidluckan A genom ett val av användaren. När tidluckan är ledig kan användaren trycka på talknappen och få den tilldelad till sig. En talsändning kan då genomföras. Våldigt korta fördröjningar för talsamband kan på detta sätt åstadkommas om tidluckorna allokeras nära varandra. Även om metoden i första hand har utvecklats för tal så kan den också användas för



Figur 3.1: Illustration av synkroniserad kooperativ broadcast

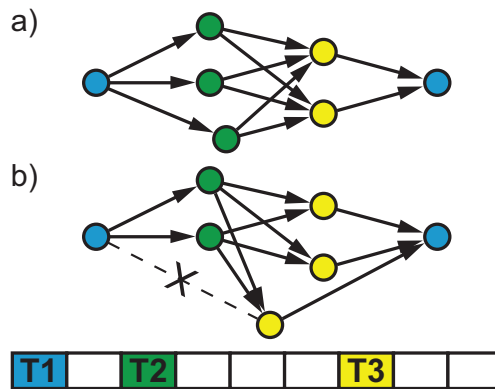
data, men då behövs förbättrade mekanismer för access till den första tidluckan i varje broadcast-sändning (tidlucka A i figur 3.1). För tidluckor B och C spelar det ingen roll vilken typ av data det är eftersom noder bara reläer vidare trafik och aldrig använder dessa tidluckor som källor till ny trafik.

En av de största fördelarna med synkroniserad kooperativ broadcast är dess robusthet under mobilitet som följer av att tekniken är tämligen okänslig mot snabba topologiändringar orsakade av att länkar går upp och ner i nätet. Detta illustreras via ett exempel i Figur 3.2. I exemplet antas länken mellan källnoden och den nedersta gröna noden vara dålig. I fas (a) finns länken och noden nås direkt från källnoden med ett hopp. I fas (b) har direktlänken gått ner och noden som nu är gul nås nu från källnoden via en grön nod och två hopp. Att en länk till en nod försvinner spelar egentligen ingen roll så länge noden kan nås via andra länkar. På samma sätt som med full flödning, så nås alla noder så länge nätet är sammanbundet.

### 3.1 Variabel datatak

Genom att använda varierande datatakt i stället för en fast vald datatak kan genomströmningen i nätet ökas markant. För broadcast- och gruppkommunikation har det saknats bra metoder att implementera variabla datatakt i ad hoc-nät. Anledningen är att ökade datatakt leder till minskad räckvidd och därmed behov till fler återsändningar. Att välja rätt datatak i ett mobilt nät blir därmed svårt.





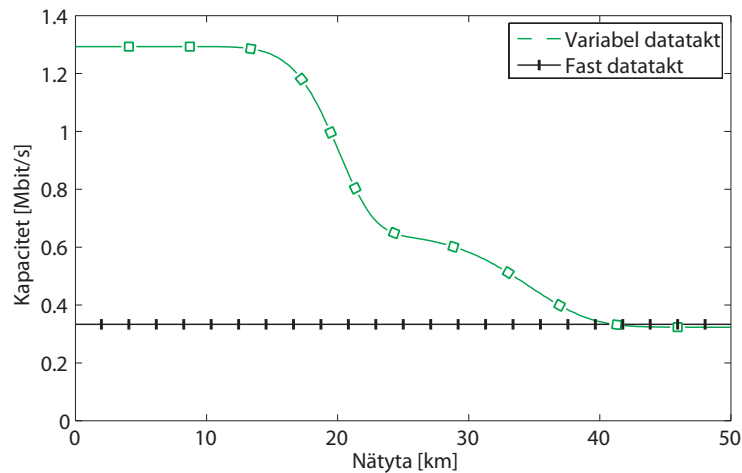
Figur 3.2: Länkar som går upp och ner påverkar inte upträdandet

I [7] visar vi hur variabla dataakter kan införas för SKB genom att införa en metod för detektion och distribution av topologiinformation. Topologiinformationen innehåller bland annat estimat av kvaliteten på länkar mellan noder och gör det möjligt för en sändarnod att beräkna den högsta dataakt som kan användas så att alla noder i nätet kan nå, dvs. så att nätet inte fragmenteras. Metoden medför att den administrativa signaleringen ökar jämfört med ett nät med bara en dataakt, men för nät upp till 150 noder är ökningen måttlig.

Vi härleder också ett analytiskt uttryck för kapacitetsvinsten i förhållande till SKB med fast dataakt och visar att kapacitetsvinsten är betydande, se Figur 3.3 för ett exempel på vinsten. Nätkapaciteten är här beräknad som funktion av sidan av kvadraten som nätet täcker. För mindre ytor kan den högre dataakten utnyttjas väl, men om radionätet sprids ut kommer dataakterna succesivt minska.

## 3.2 Återutsändningsavstånd

I exemplet i Figur 3.1 är återutsändningsavståndet tre, vilket innebär att noder som är separerade tre hopp inte interfererar med varandra och därför kan sända samtidigt. Alltså behöver endast tre tidluckor användas för att sända en ström av paket genom nätet. Detta gäller oberoende av hur många hopp som krävs för att nå alla noder i nätet. Det som däremot påverkas av antal hopp är fördröjningen. Återutsändningsavståndet beror bland annat på hur mycket interferenser mottagarna kan hantera, men det måste vara minst tre. Om ett avstånd på tre är tillräckligt, eller om det ibland måste vara större beror på flera faktorer, som nätstorlek, förbundenhet och spektraleffektivitet. Detta innebär att det ibland kan behöva allokeras fyra tidluckor, eller till och med fem, och inte bara tre som i exemplet, för att sända en ström av paket genom ett nät. Återutsändningsavståndet för olika fall har undersökts av projektet och några preliminära resultat visas i Figur 3.4. Figuren visar robusthet (i termer av hur stor andel av paketen som kommer fram) som funktion av förbundenhet för ett 64-noders nät. I detta fall kan vi se att återutsändningsavståndet behöver vara minst fyra i de flesta fall om vi inte vet



Figur 3.3: Kapaciteten för variabel dataakt jämfört med fix dataakt i ett SKB-nät.

att nätet är väl förbundet (i vilket fall det normalt inte ens är fyra hopp i nätet). Högt spektraleffektivitet (dvs. många bitar/s/Hz) kan dessutom kräva högre återutsändningsavstånd än fyra. Däremot, om frekvenshopp används för att reducera interferensnivån kan vi visa att det räcker det med ett återutsändningsavstånd på tre. Frekvenshopp används ofta i militära system.

Vi räknar med att publicera dessa resultat i en form av en artikel under 2015.

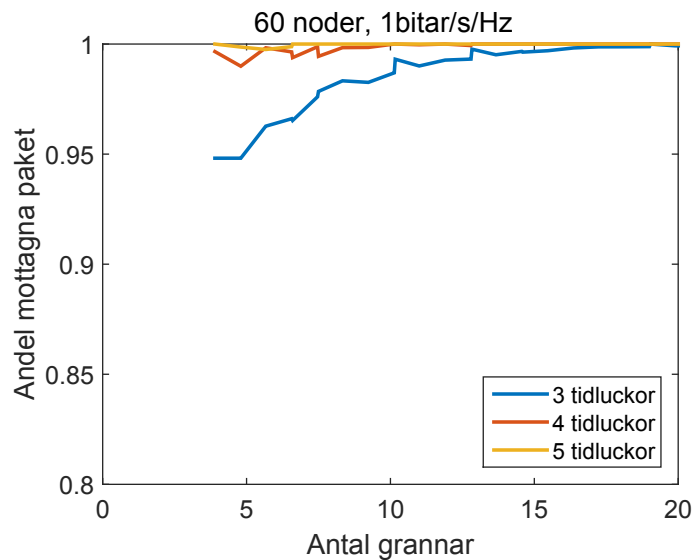
### 3.3 Jämförelse mellan SKB och TDMA

De främsta fördelarna med SKB är att vi kan uppnå en robusthet jämförbar med full flödning, men med klart bättre effektivitet. I synnerhet när det gäller broadcast-trafik är kapaciteten hos dagens radiolösningar klart begränsad. Eftersom en stor del av trafiken som går i näten är av broadcast-typ kan en ökning av kapaciteten för den typen av trafik ge stora vinster.

I projektet har vi utfört en kapacitetsjämförelse för broadcast-trafik mellan SKB och de tekniker som används i dagens radiosystem. Tidluckestrukturen som används i SKB gör att kapaciteten är oberoende av nätets topologi. Det som bestämmer kapaciteten är återutsändningsavståndet, beskrivet ovan, där kapaciteten är omvänt proportionell mot återutsändningsavståndet. I fallet med återutsändningsavståndet 3 blir således kapaciteten 1/3 av länkdataakten.

I de flesta alternativa radiosystem för militära ad hoc-nät används istället TDMA-baserade lösningar där spatiell återanvändning, dvs. att flera noder kan sända i samma tidlucka, samt avancerade routing-algoritmer skall ge effektivitetsvinster. Ett problem med den här typen av lösningar är att antalet noder som reläer paket i glesa nät snabbt växer, vilket leder till låg kapacitet.

En av de vanligast förekommande routingteknikerna för broadcasttrafik idag är så kallad MPR-flödning (Multi Point Relay). Tekniken används inom OLSR (Optimized



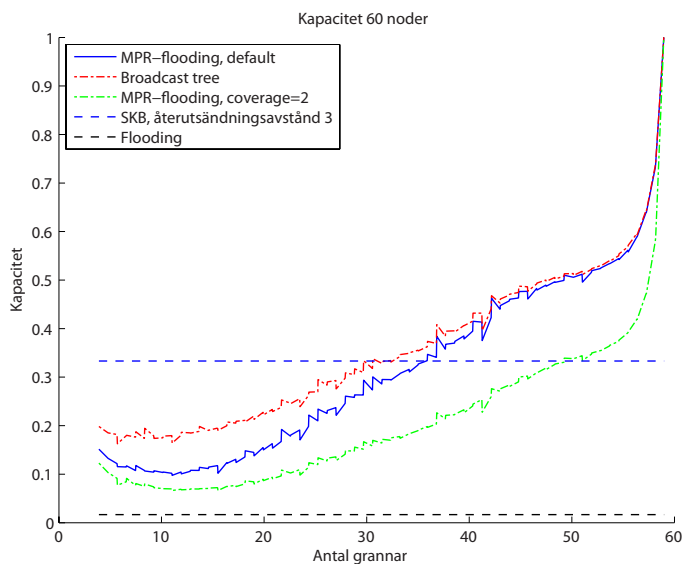
Figur 3.4: Jämförelse av robusthet vid olika återutsändningsavstånd för ett nät med 60 noder.

Link State Routing) och bygger på att en nod väljer ut en delmängd av sina grannoder som reläer och endast dessa återutsänder paket från noden. Hur dessa noder väljs och mer detaljer kring MPR-flödning återfinns i [8]. MPR-flödning, i dess standardversion, är dock inte speciellt robust mot mobilitet. I OLSR-standardens finns beskrivet ett antal tekniker för att öka robustheten i MPR-valet. En av dessa tekniker är att välja extra MPR-noder. Följden blir att robustheten ökar på bekostnad av kapaciteten.

En annan, mer optimal routing-metod är så kallade broadcast-träd. Broadcast-träd minimerar antalet återutsändande noder genom att träd byggs upp från startnoden till alla mottagar-noder. Broadcast-träd leder till färre omsändningar än MPR-flödning, och därmed högre effektivitet, men är känsliga mot topologiförändringar och mobilitet och lämpar sig därför bäst för statiska nät.

I Figur 3.5 illustreras en jämförelse av kapaciteten för SKB, MPR-flödning (med och utan extra MPR-noder) samt broadcast-träd som funktion av förbundenheten i näten (till vänster finns glesa nät och till höger täta nät). I glesa nät är vinsterna med att använda SKB stora, jämfört exempelvis med den robusta varianten av MPR-flödning är kapaciteten 3-4 gånger högre. Om hänsyn tas till den kontrolltrafik som krävs för att upprätthålla TDMA-schemat och MPR-algoritmen, i ett mobilt nät, blir skillnaderna ännu större. I välförbundna nät, som i praktiken är 2-hopp- eller 1-hoppnät, erhålls en lägre kapacitet med SKB jämfört med de STDMA-baserade lösningarna. Detta beror återigen på den fasta tidluckestrukturen. Det är dock möjligt att höja kapaciteten i dessa fall, exempelvis genom att använda variabel datatakt som kan höja kapaciteten för väl sammanbundna nät, se Avsnitt 3.1.

I utvärderingarna exkluderas kostnader för kontrolltrafik som behövs för TDMA- och routing-algoritmerna. Detta innebär att de prestandauppskattningar för MPR-flödning



Figur 3.5: Kapacitetsjämförelse mellan SKB och olika TDMA-baserade lösningar

och broadcastträd, mot vilka SKB jämförs, kan ses som en övre gräns för vad som är möjligt att åstadkomma med dagens radiolösningar.

Denna jämförelsestudie ämnar vi publicera i början på 2015.

### 3.4 Utvärdering av kooperativ reläteknik

Vid SKB sänder sändaren sitt meddelande och de enheter som kan avkoda meddelandet sänder det i sin tur vidare samtidigt. I mottagaren kombineras sedan signalen ihop från alla som sänt vidare (reläat) meddelandet. Signalerna kan antingen förstärka eller försvaga varandra i mottagaren. Risken att signalerna försvagar varandra (adderats destruktivt) är större i ett smalbandigt system än i ett bredbandigt system. Utvärderingen sker med hjälp tidigare uppmätta kanaldata i stadsmiljö i Linköping [9]. Att använda riktiga kanaldata är en fördel eftersom det ger en realistisk bild av kommunikation i en stadsmiljö.

För att värdera hur bra kooperativ reläteknik fungerar undersöktes först prestanda för tvåhoppsnät. Relänoderna antogs vara spridda över Linköping i de positioner det fanns mätningar för. Prestanda för kooperativ reläteknik jämfördes med att endast en optimalt valt relänod reläade meddelandet. Resultaten visar att i de allra flesta fallen blir kooperativ reläteknik lika bra eller bättre än med den optimalt valda relänoden. I vissa fall blir prestanda för kooperativ reläteknik sämre än för den optimala relänoden. Detta är vanligare för det smalbandiga systemet och sker i mindre än 5-10% av fallen med enbart några få dB sämre resultat. Resultaten har presenterats på konferensen MILCOM 2013 i San Diego [10].

Arbetet gick sedan vidare med att undersöka hur väl kooperativ reläteknik fungerar vid kommunikation mellan grupper i en stadsmiljö, dvs när relänoderna befinner sig relativt nära varandra. Prestanda undersöktes för ett hopp då alla sändare befinner sig på samma gata. Vågutbredningsförhållandena mellan sändare och mottagare förmodas vara mer lika i detta fall än om sändarna är utspridda över en större yta. Risken för destruktiv interferens blir då större vilket kan kräva någon teknik för att minska korrelationen mellan sändarna. Exempel på sådana tekniker är tidsspridning (delay diversity) eller fasspridning (phase dithering) [11]. Dessa tekniker minskar risken för destruktiv interferens men kommer till en kostnad av ökad overhead i systemet. Vid tidsspridning fördröjs sändningarna från de olika relänoderna en slumpmässig tid vilken är olika i de olika noderna. Resultatet i mottagaren kan betraktas som en ökad tidsspridning på kanalen vilket systemet måste kunna hantera. Det kan leda till att längre guardtider behöver användas men troligen är systempåverkan inte så stor. För fasspridning slumpas istället faser om några gånger under ett paket för att minska korrelationen. Detta leder till att kanalen måste estimeras på nytt för varje sådan fasspridning, vilket innebär att mer träningsinformation måste sändas. Resultaten från analysen visar att i medel blir den mottagna signalen från flera relänodes flera dB starkare än signalen från en enstaka nod. En kanske ännu större vinst är att risken för att signalen är för svag för att kunna tas emot minskar betydligt.

Utvärderingen har genomförts för att undersöka vilka vinster respektive förluster som kan förväntas med kooperativ reläteknik om bara ett eller två hopp analyseras. De stora vinsterna med SKB-tekniken förväntas ske i ett större nät där mycket kan vinnas på att trafiken kan gå olika vägar. Utvärderingen visar dock att även på ett eller två hopp kan kooperativ reläteknik ge vinster i form av högre mottagen signalstyrka eller minskad risk för avbrott i trafiken.

FOI-R--3967--SE

## 4 Slutsatser

Slutsatserna från projektets arbete är att synkroniserad kooperativ broadcast verkar vara den effektivaste lösningen för att hantera multicast-trafik, vilket är vitalt i militära kommunikationssystem. SKB ger korta fördröjningar och är okänslig för mobilitet. Detta utnyttjas i de få fall där vi ser tekniken användas idag, såsom push-to-talk-tal.

Men i projektet har visats att SKB har minst lika hög (eller högre) kapacitet än vad som går att åstadkomma för "vanlig" ad hoc-näts teknik, vilket innebär att det kan vara lämpligt för all datatrafik, även i fall där fördröjningskrav, mobilitetskrav och robusthetskrav är mindre hårda. Det finns dock en rad kvarvarande frågor med tekniken att besvara, såsom behov av tidssynkronisering, effektförbrukning och hur effektivt punkt-till-punkt-trafik kan hanteras.

Det arbete som genomförts inom projektet "Dynamisk resurshantering i taktiska nät" har sammanfattats i denna rapport. Projektet har genomförts under 2012-2014 inom ramen för Försvarmaktens samlingsbeställning FoT (Försvarmaktens Forskning och Teknikutveckling).

FOI-R--3967--SE



## Referenser

- [1] A. Hansson, J. Nilsson och J. Grönkvist. Taktiska scenarier för fordonsburen radiokommunikation. Teknisk rapport FOI-R--3482--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, Sweden, 2012.
- [2] C. Serra et. al. ESSOR HDRWF - Capabilities and prespectives of an innovative coalition waveform. I: *Military Communications Conference, MILCOM 2013 - 2013 IEEE*, Nov 2013.
- [3] A. Komulainen, J. Grönkvist och U. Sterner. Distributed spatial reuse time division multiple access. Teknisk rapport FOI-R--3960--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, Sweden, 2014.
- [4] J. Löfvenberg, J. Grönkvist och A. Hansson. Data rate selection for efficient broadcasting in ad hoc networks. *IET Communications*, 2012.
- [5] J. Grönkvist et. al. Adaptation delay and its impact on application performance for TDMA ad hoc networks. I: *MedHocNet 2012*, Jun 2012.
- [6] J. Nilsson, A. Hansson, J. Grönkvist och S. Linder. Kooperativ reläteknik i taktiska ad hoc-nät. Teknisk rapport FOI-R--3725--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, Sweden, 2013.
- [7] J. Grönkvist, A. Hansson och J. Nilsson. A method for variable data rate broadcasting in ad hoc networks. Inskickat till *Wirel. Commun. Mob. Comput.*
- [8] T. Clausen och P. Jacquet (Editors). Optimized link state routing protocol (OLSR). I: *IETF, Request for Comments 3626*, Oct 2003.
- [9] G. Eriksson, S. Linder, K. Wiklundh, P. Holm, P. Johansson, F. Tufvesson och A. Molisch. Urban peer-to-peer MIMO channel measurements and analysis at 300 MHz. I: *Proc. IEEE MILCOM 2008*, San Diego, CA, USA, november 2008.
- [10] G. Eriksson, S. Linder och J. Grönkvist. Measurement-based analysis of two-hop cooperative relaying. I: *Military Communications Conference, MILCOM 2013 - 2013 IEEE*, ss 538--543, Nov 2013.
- [11] D.K. Lee och K.M. Chugg. A pragmatic approach to cooperative communication. I: *Military Communications Conference, 2006. MILCOM 2006. IEEE*, ss 1--7, Oct 2006.

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Förvarsdepartementet. 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](http://www.foi.se)