



## Taktiska Ad hoc-nät

Broadcast med adaptiv datatakt

ANDERS HANSSON, JIMMI GRÖNKVIST

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  
Ledningssystem  
Box 1165  
581 11 Linköping

Tel: 013-37 80 00  
Fax: 013-37 81 00

[www.foi.se](http://www.foi.se)

FOI-R--2820--SE  
ISSN 1650-1942

Användarrapport  
September 2009

**Ledningssystem**

Anders Hansson, Jimmi Grönkvist

# Taktiska Ad hoc-nät

Broadcast med adaptiv datatakt

|                          |   |
|--------------------------|---|
| Titel                    | Taktiska Ad hoc-nät<br>Broadcast med adaptiv dataatak |
| Title                    | Tactical Ad hoc Networks Multi-rate Broadcast         |
| Rapportnr / Report No.   | FOI-R--2820--SE                                       |
| Rapporttyp               | Användarrapport                                       |
| Report Type              | User Report   |
| Månad / Month            | September / September                                 |
| Utgivningsår / Year      | 2009  |
| Antal sidor / Pages      | 12  |
| ISSN                     | 1650-1942   |
| Kund / Customer          | FM  |
| Kompetenskloss           | 22 Robust telekommunikation                           |
| Projektnr / Project No.  | E53057  |
| Godkänd av / Approved by | Pär Carlshamre  |

|   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| FOI, Totalförsvarets Forskningsinstitut | FOI, Swedish Defence Research Agency |
| Avdelningen för Ledningssystem          | Command and Control Systems          |
| Box 1165                                | P.O. Box 1165                        |
| 581 11 LINKÖPING                        | SE-581 11 LINKÖPING                  |

## Sammanfattning

Mobila ad hoc-nät är trådlösa flerhopsnät som har förmågan att dynamiskt anpassa sig efter varierande förhållanden. En stor taktisk vinst med ad hoc-nät är att de kan fungera oberoende av basstationer och annan fast infrastruktur om så krävs. Tekniken är lämplig både för fordonsburna och handburna enheter. Försvarmakten har påbörjat anskaffning och utveckling av fordonsburna ad hoc-nät (GTRS, Gemensamt Taktiskt Radiosystem) och längre fram kommer även handburna enheter att vara av intresse.

I ett helt mobilt radionät finns inga höga antenner. Kapaciteten är därför mer begränsad på grund av besvärliga utbredningsförhållanden jämfört med radionät som har fasta basstationer. Därför är det viktigt att radionätet kan hantera tillgängliga resurser effektivt.

I den här rapporten ger vi en översiktlig beskrivning av broadcast och multicast, med fokus på hur adaptiv datatakt kan utnyttjas till detta. Broadcast i flerhopsnät innebär att en sänder till alla, multicast innebär att en sänder till en utvald grupp i nätet. Denna typ av trafik förväntas utgöra en mycket stor andel av den totala trafiken i taktiska mobila radionät. Tyvärr gäller inte detta för kommersiella radiosystem, varför nya egna lösningar behövs.

Med adaptiv datatakt kan man dynamiskt byta räckvidd mot kapacitet på länkarna i ad hoc-nätet. En stor fördel med detta är att noder nära varandra kan kommunicera med hög kapacitet; en annan fördel är att nätet kan förhindras att falla sönder genom att tillåta en lägre kapacitet på vissa länkar. Detta är relativt rättframt att tillämpa i cellulära system men är mer komplext för ad hoc-nät, speciellt för broadcast-trafik.

Vi sammanfattar kort 2009 års forskning inom projektet "Kommunikation för tal- och databaserad stridsledning" för detta problemområde. Fyra metoder att utnyttja adaptiv datatakt i taktiska ad hoc-nät med broadcast-trafik har utvärderats.

Nyckelord: ad hoc-nät, routing, broadcast, multicast, adaptiv datatakt

## Abstract

Mobile ad hoc networks are wireless multi-hop radio networks that have the ability to dynamically adapt to changing conditions. A great tactical gain in ad hoc networks is that they can function independently of base stations and other fixed infrastructure if required. The technique is suitable both for vehicle-borne and hand-held devices. The Swedish Armed Forces has begun the acquisition and development of vehicle-borne ad hoc networks (GTRS) and later hand-held devices will also be of interest.

In a fully mobile radio networks, there are no high antennas. Capacity is more limited because of the difficult propagation conditions compared to radio networks with base stations. It is therefore important that the radio network can manage available resources efficiently.

In this report we give an overview of broadcast and multicast, with a focus on how adaptive data rate can be utilised. Broadcast in multi-hop networks means that one transmit to all, while multicast means that one transmit to a selected group in the network. This type of traffic is expected to be a very large part of the total traffic in tactical mobile radio networks. Unfortunately, this is not the case in commercial radios and there is a need for separate solutions for tactical networks.

With adaptive data rate, we can dynamically trade range for capacity in the ad hoc network. A major benefit is that nodes close to each other can communicate at high rate, another advantage is that the network can be prevented from falling apart by allowing a reduced capacity on some links. This is relatively straightforward to apply in cellular systems, but is more complex for ad hoc networks, especially for broadcast traffic.

We summarize briefly the research for year 2009 in the project "Communications for Voice and Data-Based Command and Control" for this problem area. Four methods to utilize adaptive data rate in tactical ad hoc networks with broadcast traffic has been evaluated.

Keywords: Ad hoc networks, routing, broadcast, multicast, multi-rate

## Inledning

Den här rapporten beskriver kortfattat hur adaptiv datatakt kan utnyttjas för broadcast i taktiska mobila ad hoc-nät. Inom FOI-projektet "Kommunikationsnät för tal- och databaserad stridsledning" har fyra metoder definierats och utvärderats. Vi sammanfattar resultaten här.

## Taktiska mobila radiosystem

Mobila ad hoc-nät är trådlösa flerhopsnät med förmåga att dynamiskt anpassa sig efter varierande användarbehov, terräng, och kommunikationsflöden. Näten kan fungera självständigt, dvs. oberoende av basstationer och annan fast infrastruktur, men ska också kunna fungera som en integrerad del av de fasta näten, se figur 1. Försvarsmakten har nu börjat införa denna typ av nät genom de första leveranserna av GTRS-vågformer. Dessa kan ses som en första generation av fordonsbaserade ad hoc-nät, men vidare utveckling förväntas ske inom de närmaste åren. Även utveckling av handburna enheter kommer vara relevant på lite längre sikt.

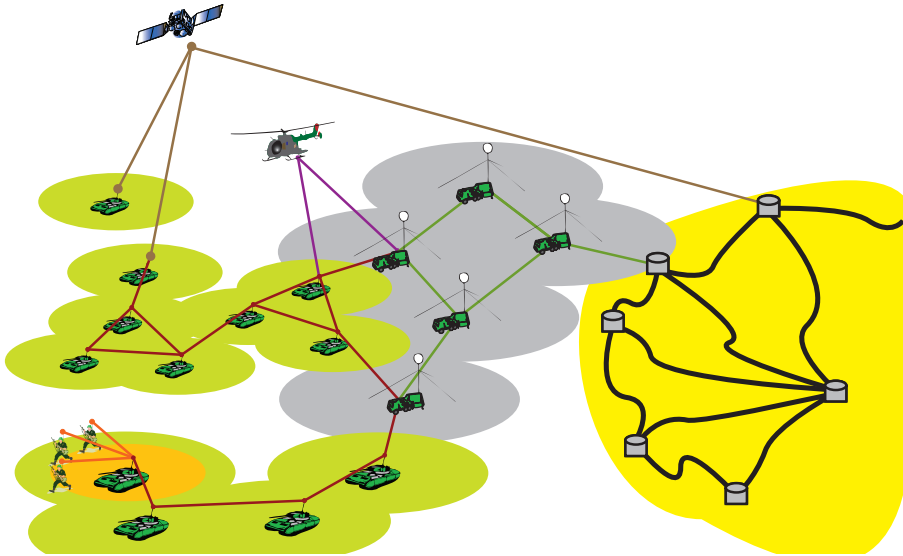
På grund av besvärliga utbredningsförhållande (bland annat låga antenner på mobila enheter) och behovet att reläa trafik för att nå tillräckligt långt är kapaciteten i dessa nät alltid begränsad. En mycket viktig faktor för ad hoc-nätets prestanda är att nätstyrning och radiokanalen utnyttjas på ett så effektivt sätt som möjligt.

## Taktiska krav uppfylls inte med kommersiell teknik

En mycket stor andel av den användartrafik som förväntas gå i taktiska mobila radionät är av typen multicast eller broadcast. Multicast innebär att trafiken har många mottagare i nätet, broadcast innebär att alla noder i nätet är mottagare. Detta kan jämföras med unicast, där det bara finns en destination i nätet. Grupptal och distribution av status och positioner är exempel på taktiska kommunikationstjänster som genererar broadcast-trafik och multicast-trafik.

Att en stor del av trafiken i taktiska nät förväntas vara multicast, kan till exempel ses i specifikationen till de första GTRS-vågformerna där enbart krav på multicast-trafik har ställts. För unicast-trafik finns enbart kravet att den ska kunna hanteras.

Behovet av broadcast och multicast i taktiska ad hoc-nät skiljer sig en del från civil forskning (trots att en hel del finansieras militärt från bl. a. DARPA), där algoritmer och protokoll för att hantera unicast-trafik har haft primärt fokus. Det finns flera skäl till detta. Ett skäl är att lösningar för unicast-trafik är ett enklare problem att studera. Ett annat skäl har varit den kraftiga utvecklingen av civila standarder. Standarden IEEE 802.11 (Wireless Local Area Network, WLAN) och dess implementeringar [1] dominerar kommersiella ad hoc-nät, eftersom den erbjuder en billig plattform för utveckling och test av ad hoc-nät. Det finns dock begränsningar med WLAN-protokollen eftersom huvudtillämpningen är kontorsmiljö (få hopp och låg mobilitet) snarare än mobila flerhopsnät, vilket leder till sämre prestanda i vissa fall. Detta är särskilt märkbart för



Figur 1: Ett sammansatt taktiskt kommunikationsnät med handburna enheter (orange), fordonsburet ad hoc-nät (grönt), transportbara enheter med längre räckvidd (grått) och ett fast nät (gult).

broadcast-trafik.

## Radionätet utnyttjar en gemensamma radiokanal

Standarden IEEE 802.11 baseras på CSMA (Carrier Sense Multiple Access) vilket i korthet går ut på att man lyssnar efter andra som sänder innan man själv sänder ut ett meddelande. Detta fungerar bra om alla hör alla. I ett ad hoc-nät är detta ofta inte fallet vilket leder till problem med att noder börjar sända trots att andra noder i omgivningen försöker ta emot meddelanden från andra noder. Detta kallas för "hidden terminal"-problemet och kan lösas genom att skicka en kort begäran om att sända (Request-To-Send, RTS) som mottagaren svarar på (Clear-To-Send, CTS). Metoden är dock svår att använda för broadcast-trafik eftersom alla grannar skulle behöva sända ett svar på ett systematiskt sätt.

Tidsdelning (Time Division Multiple Access, TDMA) är ett annat sätt för många noder att samordna sändningarna. Detta innebär att radionoderna tilldelas bestämda tidluckor som de får sända i. I militära system använder man ofta TDMA, för att förenkla hanteringen av trafik med kvalitetskrav och hanteringen av broadcast-trafik. Den första GTRS-vågformen är ett exempel på detta.

## Ad hoc-nät med adaptiv datatakt

Routingalgoritmer beskriver hur noderna i ad hoc-nätet ska distribuera information om länkarna i nätet, så att de paket som skickas i nätet hamnar rätt. I allmänhet är lösningar för broadcast i ad hoc-nät enkla modifieringar av de vanligare algoritmerna för unicast-trafik. För routingändamål så modelleras normalt länkarna i nätet så enkelt som möjligt, dvs. man utnyttjar endast information om att det finns en länk mellan två noder eller inte. Det är emellertid viktigt att även hantera information om länkarnas kvalitet. Routing-algoritmer som försöker hitta den bästa vägen mellan två noder genom att minimera antalet hopp, tenderar att välja länkar som sträcker sig över långa distanser. Dessa länkar är ofta svaga (i termer av mottagen effekt) och är därmed mer känsliga för förändringar, såsom mobilitet och störning (avsiktlig eller oavsiktlig).

I ett ad hoc-nät är variationerna i den mottagna radiosignalens kvalitet stora, bland annat på grund av att avståndet mellan noderna förändras, men också på grund av varierande utbredningsförhållanden för radiovågorna. Länkar med hög signalkvalitet är mindre känsliga för störningar och är därför att föredra om man vill hitta pålitliga vägar i nätet. En princip som i ännu högre grad utnyttjar variationerna i kvalitet, är att dynamiskt anpassa datatakten på länkarna i nätet (adaptiv datatakt). Sådana tekniker är rättframma att använda i mobiltelefonisystem. Adaptiv datatakt möjliggör ett bättre kapacitetsutnyttjande men är mer komplexa att tillämpa i ad hoc-nät och kräver förändringar i dagens ad hoc-nätsprotokoll.

## Effektivare kommunikation med adaptiv datatakt

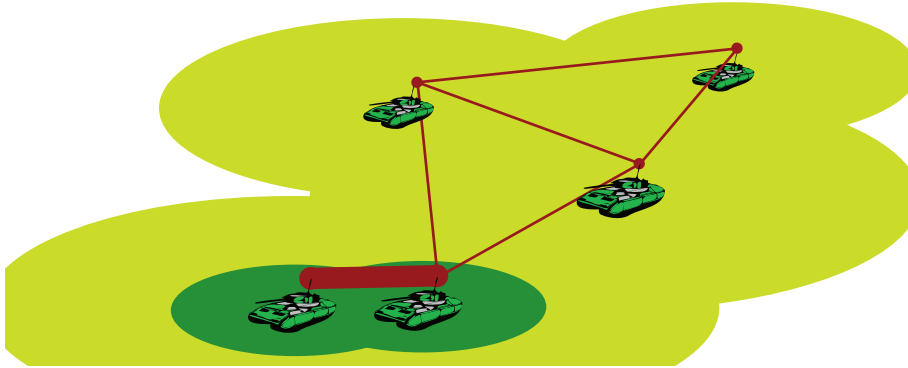
Man kan notera flera fördelar med att anpassa datatakten till den rådande situationen i nätet. Ett exempel visas i figur 2 där två noder för tillfället är närmare varandra än normalt. I vanliga fall skulle detta enbart ha gett mer marginal mot interferenser, men här kan det även utnyttjas till en högre datatakt för användardata (den tjocka länken i bilden).

Man kan även använda adaptiv datatakt för att, utan att behöva införa nya vågformer, binda ihop ett nät som annars skulle falla sönder. Anta att vi har ett fall som i figur 3, där nätet separerats i tre delar. Genom att sänka datatakten på några länkar kan kommunikation upprätthållas trots avståndet. Datatakten mellan grupperna blir begränsad men nödvändiga tjänster kan fortfarande hanteras. Införandet av adaptiv datatakt medför dock nya problem för nätverksprotokollen eftersom dessa idag ej är anpassade för detta.

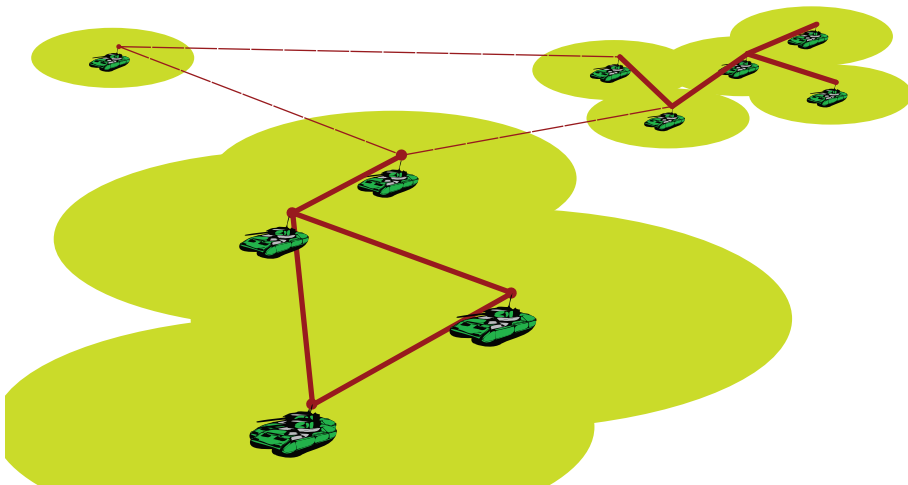
## Problem som måste lösas

Routing-protokollen måste ta hänsyn till de olika möjliga datatakterna på länkarna för att hitta lämpliga vägar. För unicast-trafik kan detta göras genom att sätta kostnader på länkarna proportionellt till sändningstiden för ett paket. Med en högre datatakt kan ett paket överföras snabbare, vilket alltså värderas med en lägre kostnad på länken, se





Figur 2: Adaptiv datatakt kan användas för att få en hög datatakt när noder befinner sig nära varandra (den tjocka länken).



Figur 3: Adaptiv datatakt kan även utnyttjas till att förhindra att nätet faller sönder. Det tunna länkarna har lägre datatakt men längre räckvidd. Utan dem skulle nätet falla sönder i tre separerade delar.

även [4], [5], [6]. För broadcast-trafik är problemet mer komplext. Genom att använda en hög datatakt når man få närliggande noder och många återsändningar behövs för att nå hela nätet. Med en lägre datatakt nås fler noder per sändning och färre sändningar behövs. Balansen mellan dessa alternativ är viktig för att få effektiv broadcast i ad hoc-nät [3].

## Möjliga lösningar

I [2] har inom FOI-projektet "Kommunikationsnät för tal- och databaserad stridsledning", studeras lämpliga metoder att utnyttja adaptiv datatakt i taktiska ad hoc-nät med broadcast-trafik. Här följer en kort sammanfattning av resultaten från rapporten. Fyra (mer eller mindre praktiska) metoder för att välja lämpliga datatakt definieras och utvärderas:

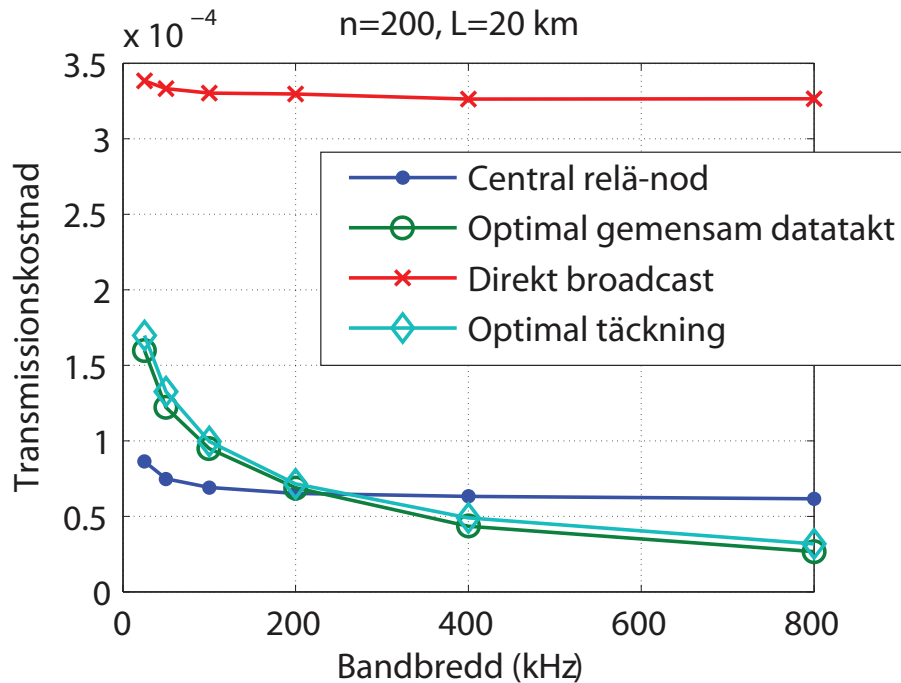
**Direkt broadcast** I denna metod ignoreras i princip flerhoppsegenskapen hos ad hoc-nät i den meningen att alla noder väljer en tillräckligt låg datatakt för att alla andra noder ska kunna nås med ett hopp. Detta leder normalt till mycket låga datatakt och är för stora nät förmodligen inte praktiskt möjligt eftersom en nod i ena kanten av nätet måste nå hela nätet i en sändning. Metoden är dock intressant som referens.

**Central relä-nod** En centralt placerad nod väljs ut för att skicka information till alla noder i nätet (med relativt låg datatakt). Andra noder skickar paketen med unicast-sändningar till denna nod. Algoritmer för att välja ut den centrala noden behöver utvecklas vidare. Dessutom är det i praktiken svårt att veta med vilken datatakt som alla noder kan nås, på grund av mobiliteten i nätet. Praktiska implementeringar kommer antagligen inte riktigt att nå upp till resultaten som visas nedan.

**Optimal täckning** Här använder alla noder en gemensam datatakt för broadcast. Datatakten väljs utgående från ett teoretiskt samband som härleds i [2]. Sambandet är en approximation för den gemensamma datatakt som idealt ger lägst transmissionskostnad per täckt yta. Det intressanta med detta optimum är att det är linjärt beroende av datatakten och oberoende av både den täckta ytan och nätets storlek.

Detta ger ett praktiskt redskap att välja en lämplig gemensam datatakt för nätet. En förutsättning är att nätet är relativt stort i förhållande till räckvidden hos noderna.

**Optimal gemensam datatakt** Även i detta fall väljs den datatakt som ger lägst transmissionskostnad för nätet. Detta val är enkelt att beräkna i en simulering, men är en opraktisk lösning i verkliga nät. Metoden är emellertid intressant att använda som jämförelse med andra metoder.



Figur 4: Detta diagram ur [2] visar medelvärden för hur transmissionskostnaden beror av vald bandbredd i 500 slumpmässigt genererade nät med 200 noder. Nodernas positioner har valts slumpmässigt inom en kvadrat med sidan 20 km.

## Utvärdering

Figur 4 visar ett exempel på det simulerade uppträdandet hos de olika metoderna i nät med 200 noder, utspridda över en relativt stor yta (en kvadrat med sidan 20 km), som funktion av den tillgängliga frekvensbandbredden. Transmissionskostnaden är proportionell mot hur mycket kanalresurser som tas i anspråk för broadcast av ett meddelande (hög transmissionskostnad innebär låg tillgänglig användarkapacitet och vice versa). Metoden *direkt broadcast*, som innebär att sända direkt med låg datatakt utan någon form av relänoder till hjälp är ineffektiv. Kostnaden är flera gånger högre än för de andra metoderna, speciellt vid stor tillgång på bandbredd.

Att välja en central nod och använda denna som relänod (*central relänod*) är en mycket bättre lösning. Som figur 4 visar, så blir detta till och med den bästa av de föreslagna lösningarna för system med låg bandbredd. Relativt de andra metoderna är metoden *central relänod* ännu bättre för nät med fler noder per ytenhet, se [2]. Det kan dock vara praktiskt svårt att i ett mobilt nät bestämma den datatakt som den centrala noden måste använda.

Transmissionskostnaden för metoderna *optimal täckning* och *optimal gemensam datatakt* ligger mycket nära varandra. Detta visar att valet av datatakt enligt metoden *optimal täckning* är ett bra val om alla noder ska sända med samma datatakt. Metoden

är praktiskt intressant för implementering i ett radiosystem. Eftersom metoden *central relänod* ibland är bättre än *optimal gemensam datatakt*, så har vi också visat att det inte alltid är effektivt att använda en gemensam datatakt i ett ad hoc nät för att hantera broadcast.

Att låta alla noder använda en gemensam datatakt har dock praktiska fördelar vid implementering av ett ad hoc-nät, så metoden *optimal täckning* kan vara ett lämpligt val att utgå ifrån. Den uppfyller dock inte en av styrkorna med adaptiv datatakt; möjligheten att binda ihop nätet genom att sänka datatakten när nätet splittras, ett problem som behöver studeras ytterligare. Det kan också förekomma minimikrav på räckvidden för enskilda sändningar vilket beroende på tillgänglig bandbredd kan tvinga fram lösningar där en lägre datatakt används än den som krävs för metoden *optimal täckning*.

## Slutsatser

Viktig taktisk kommunikation, som grupptal, statusinformation och positionsinformation, genererar multicast-trafik eller broadcast-trafik i mobila kommunikationsnät. Adaptiv datatakt kan i ett ad hoc-nät ge högre datatakt på korta avstånd och även motverka att nätet splittras.

Vi har definierat och utvärderat fyra metoder att hantera broadcast med adaptiv datatakt. Metoden *optimal täckning*, som adaptivt väljer en gemensam datatakt, är både effektiv och praktiskt intressant. Vi har även visat att en gemensam datatakt i nätet inte alltid ger lägst transmissionskostnad. Det krävs mer forskning för att hitta praktiskt tillämpbara metoder som utnyttjar multipla datatakt för broadcast.

## Referenser

- [1] *IEEE 802.11, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications*, <http://standards.ieee.org/getieee802/802.11.html>, Standard, IEEE, 2007.
- [2] Jacob Löfvenberg, Jimmi Grönkvist och Anders Hansson, *Broadcast in Multi-rate Ad Hoc Networks*, Vetenskaplig rapport FOI-R--2821--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut, Linköping, 2009.
- [3] Jacob Löfvenberg, Jimmi Grönkvist, Mattias Sköld och Anders Hansson, *Broadcast with variable data rates in mobile ad hoc networks*, Vetenskaplig Rapport FOI-R--2582--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut, Linköping, 2008.
- [4] Linda Farman, Jan Nilsson och Otto Tronarp, *Using variable data rate in mobile ad hoc networks supporting delay sensitive traffic*, Teknisk rapport FOI-R--1725--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut, Linköping, 2005.

- [5] Erika Johansson, Katarina Persson, Mattias Sköld och Ulf Sterner, *AODV routing in ad hoc networks with variable data rates*, Teknisk rapport FOI-R--1430--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut, Linköping, 2004.
- [6] Linda Farman, Ulf Sterner och Otto Tronarp, *Analysis of capacity in ad hoc networks with variable data rates*, Teknisk rapport FOI-R--0928--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut, Linköping, 2003.